网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/detail/42.1755.TJ.20161228.1556.028.html 期刊网址：www.ship-research.com

引用格式：谢强，陈海龙，章继峰. 极地航行船舶及海洋平台防冰和除冰技术研究进展[J]. 中国舰船研究，2017，12(1)：45-53.
XIE Q, CHEN H L, ZHANG J F. Research progress of anti-icing/deicing technologies for polar ships and offshore platforms[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2017, 12(1): 45-53.

极地航行船舶及海洋平台防冰和除冰技术研究进展

谢强[1]，陈海龙[2]，章继峰[1]
1 哈尔滨工程大学 智能结构与先进复合材料实验室，黑龙江 哈尔滨 150001
2 哈尔滨工程大学 科学技术研究院，黑龙江 哈尔滨 150001

摘　要：极地具有气候环境极端恶劣、海气交换强烈、湿度很大等特点，在此航行（或冰区航行）的船舶和海洋平台结构表面极易形成覆冰，它不仅影响设备操作，更直接威胁到船舶和海洋平台的安全。对国内外极地航行船舶及海洋平台防冰和除冰技术的现状进行综述。首先，介绍覆冰对极地航行船舶及海洋平台不同部位的影响和危害程度。然后，归纳和分析国内外现有防冰和除冰方法与技术，包括电加热、红外线、超声导波等主动除冰方法，以及超疏水涂层、牺牲性涂层、水润滑涂层以及低交联度界面滑移涂层等被动除冰方法。最后，总结现有防冰和除冰技术在极地航行船舶及海洋平台上的适用性及优缺点，为极地航行船舶及海洋平台的防除冰设计提供参考。

关键词：极地船舶；海洋平台；防冰；除冰
中图分类号：U674.21　　**文献标志码：**A　　**DOI：**10.3969/j.issn.1673-3185.2017.01.008

Research progress of anti-icing/deicing technologies for polar ships and offshore platforms

XIE Qiang[1], *CHEN Hailong*[2], *ZHANG Jifeng*[1]
1 Smart Structures and Advanced Composite Materials Lab, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China
2 Science and Technology Research Institute, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

Abstract: The polar regions present adverse circumstances of high humidity and strong air-sea exchange. As such, the surfaces of ships and platforms (oil exploiting and drilling platforms) serving in polar regions can easily be frozen by ice accretion, which not only affects the operation of the equipment but also threatens safety. This paper summarizes the status of the anti-icing/deicing technologies of both China and abroad for polar ships and offshore platforms, and introduces the various effects of ice accretion on polar ships and offshore platforms, and the resulting safety impacts. It then reviews existing anti-icing/deicing technologies and methods of both China and abroad, including such active deicing methods as electric heating, infrared heating and ultrasonic guided wave deicing, as well as such passive deicing methods as super hydrophobic coating, sacrificial coating, aqueous lubricating layer coating and low cross-link density (with interfacial slippage) coating, summarizes their applicability to polar ships and offshore platforms, and finally discusses their advantages/disadvantages.

Key words: polar ship; offshore platforms; anti-icing; deicing

收稿日期：2016-05-17　　**网络出版时间：**2016-12-28 15:56
基金项目：国家自然科学基金资助项目（51379048）
作者简介：谢强，男，1990年生，博士生。研究方向：极地船舶与装备防冰和除冰技术。E-mail：455924666@qq.com
陈海龙，男，1980年生，博士。研究方向：极地大科学及项目管理
章继峰（通信作者），男，1976年生，博士，教授，博士生导师。研究方向：极地船舶与装备防冰和除冰技术。E-mail：jfzhang@hrbeu.edu

downloaded from www.ship-research.com

0 引 言

极地地区蕴藏着丰富的自然资源，是未来重要的能源和资源基地。根据美国地质勘探局公布的评估报告显示，北极地区探明的原油储量为900亿桶，天然气储量超过47万亿 m^3，占全球未开采石油储量的13%和未开采天然气储量的30%[1-2]，除石化燃料外，北极地区还拥有丰富的渔业、森林、淡水资源以及镍、铅、锌、铜、钴等矿产资源。随着全球气候变暖，北极冰盖逐渐融化，使北极新航道的开通成为可能。北极新航道的开通可以减少我国对常规航线的依赖，降低能源、资源运输的安全风险。极地资源开发利用和新航道通航对保障我国经济持续稳步发展、保障能源运输安全有着重要的战略意义[3]。

极地航行船舶与海洋平台是在极地地区开展资源勘探、开发、运输及科考活动的载体。然而，极地气候环境极端恶劣，长年低温多冰。北极地区冬季时间长，温度在-43～-26 ℃之间，平均气温为-34 ℃；海气交换强烈、湿度很大，大部分时间相对湿度都在95%以上，表现为多雾、浓雾，这种极端气候下形成的覆冰给极地航行船舶及海洋平台带来了极大影响[4-9]（图1）。极地航行船舶遭受到的海水溅淋（Sea spray）是船体和甲板形成覆冰的主要原因[10]，同时大气中的过冷液滴遇到装备后也在结构表面形成大量覆冰[11]，即大气结冰，如在缆绳、救生设备、通风口等形成的覆冰。覆冰不仅严重影响极地航行船舶的功能，还会增大船舶吃水深度和重心，影响船舶稳性。海洋平台覆冰可达数百吨，上层覆冰不仅会降低结构稳性、改变结构应力、降低结构可靠性，还会对极地工作区域的设备造成危害，例如：冻结绞盘、起重机、阀门，覆盖窗户，堵住通风口等。带有盐份的海水在无线电通信设备和雷达上结冰会改变其介电常数，影响信号接收。晶状覆冰还会降低摩擦系数，威胁直升机在船舶或海洋平台上的起降，结冰会增加人员滑倒的危险，冰块掉落还会威胁人员安全。

冰晶形态对装备的威胁也存在差异。海水溅淋冰（Spray ice）是过冷的海水溅射到装备上后迅速形成的结冰。对于极地航行船舶来说，由于存在与海水的相对速度和较低的高度，海水溅淋冰形成的结冰会比海洋平台更严重。与海水溅淋冰一样，积雪也会增加船舶或海洋平台的重量，覆盖在各种设备上，引起打滑。新的积雪蓬松易清除，应及时处理，否则积雪会压实成冰或融化后再凝结成雨凇冰（Glaze）。雨凇冰是冻雨与装备接触后形成的透明、致密的冰层。相较于雾凇（Rime），雨凇冰的冰层密度大，难以清除。雾凇是携带过冷液滴的雾与装备表面接触后形成的疏松、不透明的白色粒状结构沉积物，特点是比较疏松，覆盖在设备上后清除难度相对较小。此外，还有霜（Frost）、冰雹（Sleet）等结冰量较少的结冰形式。

目前，针对极地航行船舶和海洋平台的除冰方法按照除冰形式分为主动除冰法和被动除冰法。主动方法是指结冰后借助外力除冰，包括机械、盐、电加热、红外线等除冰方法，这些方法需要一定的能源或资源。被动方法是指利用涂层材料本身的属性阻止冰凝结到涂层或降低冰粘附强度（Ice adhension strength）τ_{ice}，并依靠风力或自身重力就可使冰脱离表面，这些除冰方法几乎不消耗能源。然而，极地航行船舶和海洋平台的结构复杂，各部位对各种除冰方法的适用性不同，应该结合各部位的特点选择合适的除冰方法，使除冰效率更高、更经济。

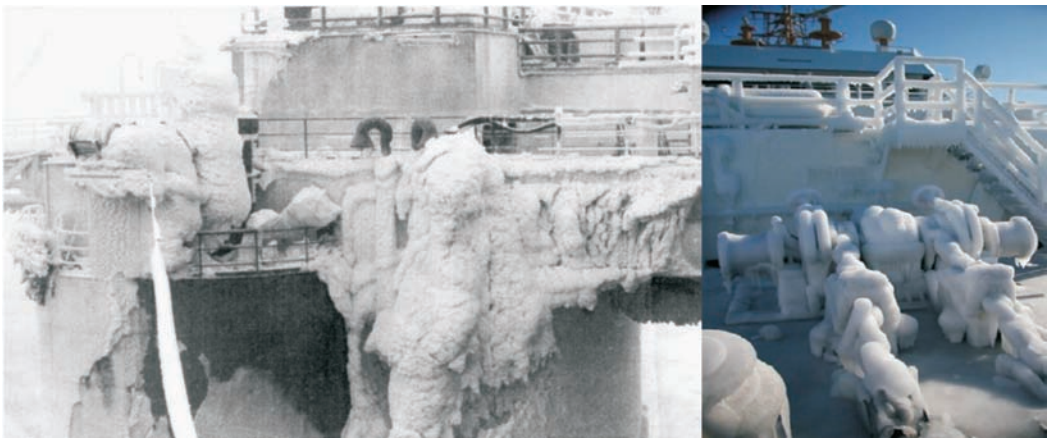

图1 海洋平台[12]（左）及极地船舶[13]（右）上的结冰

Fig.1 Ice accretion on offshore platforms[12] (left) and polar ships[13] (right)

downloaded from www.ship-research.com

1　结构覆冰对极地海洋平台的影响

1）整体稳性。

大量覆冰会增加海洋平台的重量,影响平台的稳性。对于浮体式平台,覆冰重量会增加横倾力矩,降低干舷高度[14]。由于覆冰通常发生在迎风面,不对称覆冰更容易导致海洋平台倾斜。失稳对海洋平台的危害巨大,严重时会导致平台倾覆等灾难性后果。

2）结构完整性。

低温环境下的材料性能,尤其是断裂韧性将发生衰退。当冰雪在海洋平台上局部积累时,过大的重力会产生复杂的内应力,甚至造成结构损坏,使整个平台完整性丧失。局部构件的初始设计满足平台在波浪和洋流作用下的外载荷振荡应力,而覆冰将改变平台的惯性参数、圆形部件的直径、风载响应等设计参数,造成构件局部失效,破坏结构的完整性。

3）防灾救援设备。

覆冰可降低海洋平台的自救能力,如覆盖灭火装置、冻结灭火水枪阀门、堵塞烟气传感器。覆冰还可使救生筏冻结、甲板打滑,体积庞大的冰块更会妨碍人员活动。在火灾等事故发生时,这些危险因素将阻碍及时救援和逃生。

4）通信系统。

覆冰还会导致通信设备失效。例如,卫星天线被冰覆盖后,因海冰盐分较高,将升高天线表面介电常数,影响信号接收[15],覆冰融化还可导致电子设备短路。通信系统失效不会造成海洋平台垮塌,但灾害发生时会影响海洋平台上的人员互相沟通和对外寻求救援,危害也不容忽视。

5）直升机平台与甲板。

结冰造成直升机起降平台打滑,给飞机操作安全带来风险,并可延误受伤人员的救援、关键药品的补给。水平甲板表面极易积累大量冰、雪、冻雨等。在风浪海情下,甲板上会出现大量海水溅淋冰,如果排水管道被封堵,结冰将会更严重。

6）通风口与窗户。

通风设备的作用是提供新鲜空气和排放有害气体,某些机械设备也需要空气来运转及排放废气。通风口的隔窗大多采用网状和格状设计,极易被覆冰和积雪封堵,将给人员健康、机械运转带来问题。窗户被冰覆盖后会遮挡一线作业人员的视线,一旦机械操作失误将发生人员安全、设备损毁等事故。

7）起重机与火炬臂。

起重机力臂为框架式结构,实际表面积大,很容易受到雾凇冰的影响。大量覆冰可以冻结钢丝线绞盘,甚至使起重机力臂不堪重负而折断。火炬臂(Flare boom)外形类似于起重机吊臂,上面载有燃烧系统,如果发生覆冰导致火炬臂折断或堵住油气控制通道的事故,将可能引发燃气爆炸和火灾。

8）月池。

月池是位于海洋平台中央的一块开放区域,钻井设备都在此区域作业。覆冰将导致阀门无法工作、作业效率低下。

9）附属设施。

阶梯被雨凇冰覆盖后表面打滑,威胁人员作业安全。栏杆上形状不规则的霜霾覆冰会增加栏杆直径,使人员无法抓牢栏杆引发人身安全事故。覆冰还会使阀门、手柄等操纵部位封冻而无法操作。

10）覆冰安全评估。

不同安全等级的覆冰类型对平台部位或功能的威胁程度各不相同。相对而言,海水溅淋冰对海洋平台结构的安全性威胁最大;其次是积雪和雨凇冰;雾凇清理相对容易,对结构安全性危害也低;对于结霜和冰雹类型的覆冰,前者量较少,而大质量的冰雹发生概率较低,它们对平台威胁程度相应地也较小。有鉴于此,按照重要性排序分别赋予海水溅冰、积雪、雨凇冰、雾凇、霜冰雹这6种类型覆冰10,8,7,6,4,1不同标度的危险等级。同时,根据受不同类型覆冰威胁程度赋予海洋平台功能或部位不同的风险值(RI)。表1所示为最后得到的6种类型覆冰对海洋平台综合威胁程度的评估情况(用RI表示),其中,RI值为70~100的红色区域表示威胁程度最严重,30~69的橙色区域表示威胁一般,0~29的黄色区域表示威胁轻微。

2　结构覆冰对极地航行船舶的影响

1）船舶适航性。

极地航行船舶大量覆冰将增加船体重量和船舶阻力,降低干舷高度,大量覆冰还会提高船舶重心、导致航行不稳定,引起船身倾斜,甚至发生倾覆[14]。对于上层建筑高大、干舷高度较低的船舶,大量覆冰对稳性影响较大。

2）通信及导航系统。

当通信和导航系统出现故障时,极地航行船舶相较于海洋平台或常规船舶更容易发生事故,如遭遇冰山、搁浅或陷入冰区无法脱困。同时,发

downloaded from www.ship-research.com

表1 覆冰类型和海洋平台部位或功能对平台安全性的综合影响[12]

Table 1 Joint safety impacts by ice type and platform component or function [12]

危险等级	整体稳性、结构完整性 10	防灾救援 9	通信、直升机平台、通风口 8	火炬臂 7	手柄、阀 6	舷窗 5	起重机、绞盘、楼梯 4	甲板、栏杆 3	舱门 2	下甲板、月池 1
10	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10
8	80	72	64	56	48	40	32	24	16	8
7	70	63	56	49	42	35	28	21	14	7
6	60	54	48	42	36	30	24	18	12	6
4	40	36	32	28	24	20	16	12	8	4
1	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1

生事故时，如果通信受阻，将无法联系救援人员或其他附近的船舶。

3）通风设备及舱门、舷窗。

舱室内的通风畅通对极地航行船舶至关重要，冰封后的发动机进气口会导致发动机无法运转，某些可燃气体如果不能及时排出会有爆炸危险。

舷窗上的覆冰会遮挡驾驶人员观测海情、冰山、暗礁的视线。舱门冰封后，开启舱门将变得十分困难，如果是雨凇冰或者海水溅淋冰，严重时甚至无法打开舱门，延误人员在甲板上操作设备的时间。

4）附属设施。

与海洋平台一样，极地航行船舶上的栏杆、梯子、阶梯等极易被冰雪覆盖，尤其是被雨凇冰覆盖后会造成表面打滑，非常难以清除。受梯子或栏杆上形状不规则的覆冰影响，人员会因无法抓紧而发生人身安全事故。

5）甲板覆冰。

海水溅淋冰是甲板形成覆冰的主要形式，它将造成甲板表面打滑，危及人员活动安全，而船体发生倾斜时危险性更大。如果覆冰封堵了甲板上的排水孔，甲板积水会导致大量二次结冰，严重时会极大地增加船舶的重量并提高重心高度，影响船舶稳性。甲板覆冰会冻结止链器、锚链保险钢丝及锚机脱排装置等部件，使船舶无法抛锚，当风力较大、船舶密集时会随风浪飘荡，带来很大的危险[16]。

6）结冰安全评估。

不同类型的覆冰对极地航行船舶的威胁程度与对海洋平台的威胁程度类似，海水溅淋冰也是威胁最大的覆冰。鉴于结构特点，船舶上的积雪量不如海洋平台，积雪的威胁程度相较于海洋平台小。由于极地航行船舶在航行中的危险性较大，相对于海洋平台结构，覆冰对前者的通信系统、舷窗等功能性操作系统危害更大。因此，不同类型覆冰的危险等级以及对极地航行船舶的部位或功能的威胁程度有着自己的特点。有鉴于此，按照重要性排序，分别赋予海水溅淋冰、积雪、雨凇冰、雾凇、霜、冰雹这6种类型覆冰10，6，4，3，2，1不同标度的危险等级。同时，根据受不同类型覆冰威胁程度赋予船舶功能或部位不同的风险值（*RI*）。表2所示为最后得到的6种类型覆冰对极地航行船舶综合威胁程度的评估情况，其中，*RI*值为70～100的红色区域表示威胁最严重，30～69的橙色区域表示威胁程度一般，0～29的黄色区域表示威胁程度轻微。

3 极地航行船舶与海洋平台的防冰和除冰技术

3.1 结构设计

极地航行船舶与海洋平台上的覆冰主要是海水溅淋形成的结冰，采用有效的防冰和除冰设计可显著减少覆冰量。在保证船舶或平台安全性及

表2 覆冰类型和船舶部位或功能对船舶的安全性综合影响[17]

Table 2 Joint safety impacts by ice type and ship component or function [17]

危险等级	适航性 10	防灾救援设备 9	通信设备 8	通风设施 8	舷窗 7	梯子 5	甲板、栏杆 4	舱门 2
10	100	90	80	80	70	50	40	20
6	60	54	48	48	42	30	24	12
4	–	36	32	32	28	20	16	8
3	–	27	24	24	21	15	12	6
2	–	–	–	16	14	10	8	4
1	–	–	–	–	7	5	4	–

downloaded from www.ship-research.com

性能指标的前提下,可通过增加甲板与水线的距离以减少海水溅淋冰。对于海洋平台,可以将平台的桩基设计成大直径的,以及将甲板底部设计得更平坦以增大冰层通过自身重力而脱落的可能性,以此来有效降低海水溅淋冰量。增加光滑曲面、竖直曲面设计量、减少外露小部件数量,可降低覆冰与装备的机械互锁,提高除冰的便利性和覆冰脱落的可能性。图2所示为挪威Ulstein公司设计、迪拜Polarcus公司运营的一型可以防止海水溅淋的X型船艏极地航行船舶,该型船曾于2011年成功穿越北冰洋新航道——北海航道。

图2　X型船艏防冰设计的极地航行船舶[18]
Fig.2　Anti-icing of polar ship with X-bow design[18]

总之,在满足船舶和海洋平台安全性、性能指标的前提下,应尽可能设计出最有利于降低冰雪积累的结构型式,并结合其他有效除冰方法,达到减少极地航行船舶和海洋平台覆冰的目的。

3.2　人工除冰

所谓人工除冰是人员利用铲、镐等工具将冰层剥离或击碎后再清除。人工除冰可能会对一些精密设备造成损坏,因此,仅适用于不需要保护的区域除冰。但有些情况会造成人工除冰无法实现。例如:遭遇极端天气时,人员无法登上甲板;人员无法达到的部位。总之,人工除冰方法效费比低,仅可作为备用方法。

3.3　电加热除冰法

电加热除冰法是利用电阻丝加热结构表面使温度上升到0 ℃以上以防止结冰或融化冰层,常用的装置为内埋式电阻加热元件。在关键设备中设计内埋式加热元件可使除冰方便快捷。电加热除冰法首先利用发动机驱动发电机产生电能,然后经电阻丝转化为热能,因此无用功消耗过多。该方法除了能量消耗巨大外,还存在二次结冰的风险,限制了更广泛的使用,一般仅用于天线等关键部位的除冰。在舷窗上也可采用电加热的设计,例如,布置极细的电阻丝,再利用高压的净水、雨刮除去冰晶,防止结冰遮挡驾驶人员的视线[19]。

3.4　高速热流除冰

高速热流除冰法是向被冰层覆盖的结构表面喷射高温、高压蒸汽或水流来融化或剥离冰层。此类方法最早用于飞机地面除冰,由地面提供设备和能源。在船舶和海洋平台上,可利用发动机、锅炉以及尾气产生的能量除冰,但需要预先设计复杂的导流管道。此方法可以除去较厚的冰层,但因流体的温度较高,不适宜对热敏感或含有比较软的材料如热塑性材料等部位的除冰。不仅如此,无抗冲击性能的脆性材料也不宜使用。

3.5　红外线除冰

红外线除冰法是利用红外发射源向覆冰区域照射,通过加热融化冰层。红外线波长在760 nm ~ 1 mm之间,不同材料对不同波长的红外线吸收率不同,采用波长大于3 μm的红外线照射时,冰吸收的能量较高,所以适用于除冰的红外线多为3 ~ 15 μm的中波红外线。有鉴于此,在采用红外线除冰时,必须根据覆冰类型和表面材料对不同波长的红外线吸收率选取合适的波长,以防止无法融冰或损坏涂层。对于船舶和海洋平台,可以使用可移动的小型红外面板,安装在小车支臂上以方便使用,但该方法与电加热一样存在二次结冰的风险。

3.6　超声导波除冰

超声导波除冰方法是利用电信号在薄板中激励的超声导波产生的介质表面剪切力,来克服覆冰与介质表面的粘附强度,达到除去结构表面覆冰的方法。超声导波除冰是不同于传统热力除冰的新技术,主要装置包括超声波发生器、压电制动器。压电致动器通过胶与基体平板粘连在一起,当压电致动器输入来自超声波发生器产生的一定频率的震荡电信号激励时,由于逆压电效应会在薄板内部产生一定振幅的超声波,经不断反射叠加、几何弥散后形成超声导波(如Lamb波和SH波等),这些超声波的种类既包括横波也包括纵波,并且被束缚在基体平板内传播,在2种介质交界面产生剪切应力。超声导波除冰技术的关键是它能产生足够的横向剪切力,找出在基体板内最优的导波模式。如图3所示,根据超声导波在不同

downloaded from www.ship-research.com

几何形状的平板内相关反射和叠加的过程，可设计合适的激励信号、激励频率、电压幅值以及模态[20]。Palacios等[21]利用频率为27～32 kHz的超声导波在冰与薄板界面产生了超过冰粘附强度的剪切应力，其冰层厚度为2～4 mm，钢板厚度为0.7 mm。超声导波除冰是一种新型、高效的除冰技术，具有方便快捷、能耗低、无二次结冰风险的特点。但是，由于超声导波只存在于板管结构中，对于船舶和海洋平台，超声导波除冰只可适用于板管结构区域。

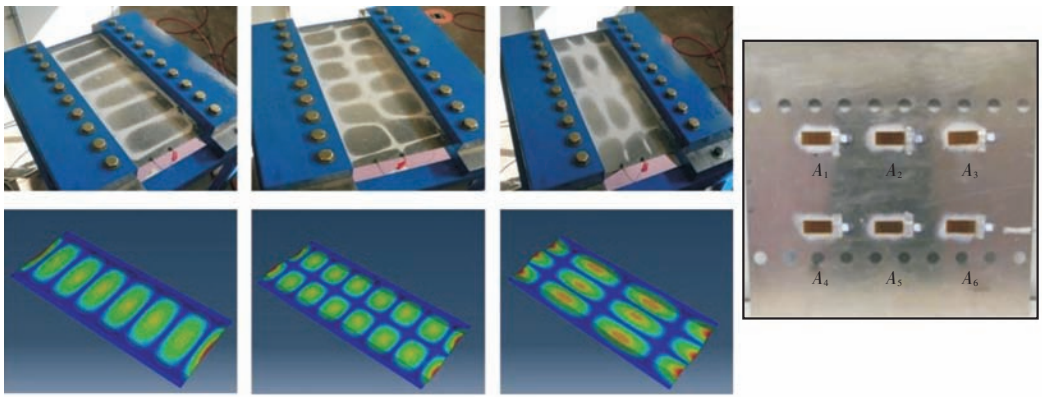

图3 基于超声导波除冰的模态控制实验[20]

Fig.3 Mode control experiment of deicing by ultrasonic guided wave method [20]

3.7 化学物质除冰

化学物质除冰是在防冰部位播散或涂抹化学物质以达到加快冰融化过程或防止结冰的目的。该方法常用于道路除雪，常用的物质包括氯化钠、氯化钙、甲酸钾、醋酸钙镁、尿素、蔗糖等。通过在积雪的道路上播散这些物质或者溶液可以降低冰点使雪融化[22]。Wåhlin等[23]研究表明，氯化钠溶液可削弱雪晶体的结合力，起到抵抗积雪压实的效果。飞机防冻液主要物质大多包含一些低凝固点的醇类，如乙烯乙二醇、异丙醇、乙醇等[24]。含有这些物质的防冻液喷洒在飞机表面，飞行过程中，这些物质与过冷水混合，可使两者混合液凝固点低于0 ℃，达到防止结冰目的。化学物质防冰有多种施加方式，包括人工播撒、喷雾器、漏液装置等。由于用于除冰的化学物质是一次性使用，成本较高，对装备腐蚀严重，同时还会对环境造成污染。极地航行船舶和海洋平台结构复杂，对于人员和播撒装置到达不了的区域或者垂直表面将无法操作，而在环境保护有特殊要求的极地区域使用大量化学物质会受到更加严格的限制。

3.8 牺牲性涂层

此类表面涂层可以不可逆地释放一些抑制过冷水结晶的小分子，同时增加冰和材料表面的润滑度，降低冰粘附强度，甚至可使覆冰自然脱落。Ayres等[25]研究了通过三丙烯乙二醇醚(TPG)、丙三醇和异丙氧基钛(TIP)化学反应，生成含有TPG、丙三醇配体的钛醇盐溶胶凝胶体系，将其嵌入到普通的疏水涂层基体中，利用钛醇盐的水解和缩合反应，使TPG和丙三醇2种分子缓慢释放达到降低水凝固点、抑制冰结晶核形成的防冰目的。但是，由于材料的有限性以及所释放分子的水溶性，涂层的使用寿命有限。

Wong等[26-27]受到猪笼草启发开发了一种液体润滑多孔表面(SLIPS)材料，将不与水相容的润滑液注入禁锢在纳米多孔基体中，并与铝表面结合。此涂层具有较高的稳定性和极高的润滑性，能有效抑制结冰，冰粘附强度仅约15 kPa。由于润滑液体有可能被脱离的冰带走而损耗，此类涂层存在时效性，也属于牺牲性涂层。

3.9 超疏水涂层

超疏水涂层是近年来受到广泛关注的技术。所谓超疏水涂层是指水接触角(Water contact angle)大于150°、滚动角小于10°的涂层，涂层具有低表面能物质修饰的表面和多级粗糙度的双重性质，可减少水或冰与材料表面的接触面积，增强冰与材料界面的应力集中，降低冰的粘附剪切强度，达到延缓结冰，且结冰后可通过很小的力或风将附着在涂层表面的冰除去的目的。制作超疏水涂层的方法有多种，如溶胶凝胶法[28]、纳米颗粒法[29]、模板法[30]、化学腐蚀[31]等，这些方法都是为了创造涂层的多级粗糙度，而纳米颗粒法最简便且适合大规模制备。超疏水涂层表面涂覆的典型低表面能物质一般为氟硅类聚合物，包括聚二甲基硅氧烷(PDMS)、聚四氟乙烯(PTFE)、多面体低聚硅倍半氧烷(POSS)等。Wang等[32]对光滑铝

downloaded from www.ship-research.com

板、苯基三乙氧基硅烷(PTES)涂覆的光滑铝板、化学腐蚀后的粗糙铝板、PTES涂覆的粗糙铝板的冰粘附强度分别进行研究,结果表明PTES涂覆的粗糙铝板的粘附强度最低,如图4所示。

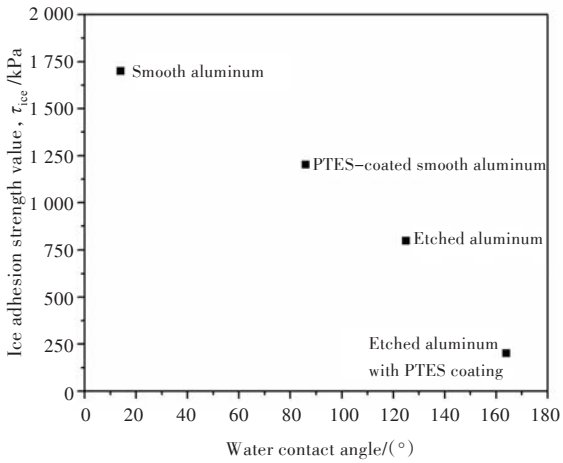

图4　不同疏水涂层的铝板在-10 ℃时的冰粘附强度[32]

Fig.4　Ice adhesion strength values of various aluminum plates with superhydrophobic coating at temperatures below -10 ℃[32]

Meuler等[33]研究了一系列材料的冰粘附强度与水后退接触角(Water receding contact angle)θ_{rec}的关系,发现冰粘附强度和$1+\cos\theta_{rec}$具有很强的相关性。此结果表明增大涂层的水后退接触角有助于减小冰粘附强度,对设计超疏水防冰涂层具有指导意义。

超疏水涂层也存在稳定性和耐久性问题。例如:微小液滴进入涂层微结构中结冰膨胀会损坏微结构形态;由于脆弱的表面形貌,多次覆冰、除冰循环后涂层的防冰性能会下降,甚至可能提高冰粘附强度[34];在水滴高速撞击下,涂层的超微结构空隙会被水填充,造成疏水疏冰性能严重降低[35],这对于经常受到海水溅淋影响的船舶来说更加不适用。超疏水涂层同时还存在表面污染问题,在一段时间后,超疏水材料表面由于附着灰尘或其他化学物质,涂层的防冰性能会显著下降。因此,研究出稳定性、耐久性高的超疏水涂层成为此项技术研究的热点。

3.10　水润滑涂层及低交联密度界面滑移涂层

Dou等[36]将亲水的二羟甲基丙酸(DMPA)接枝到聚氨酯(PU)基体上,使涂层具有亲水性,接触角仅为43°,其机理是通过吸收水分隔绝冰和涂层表面,在-15 ℃时,可将冰粘附强度降至30 kPa以下,如图5所示。环境实验表明,在-53 ℃时,水润滑层仍然存在,经过30次除冰、结冰循环后冰粘附强度几乎未变化,可长期使用。因此,相较于超疏水涂层和牺牲性涂层,水润滑涂层具有良好的稳定性和耐久性。

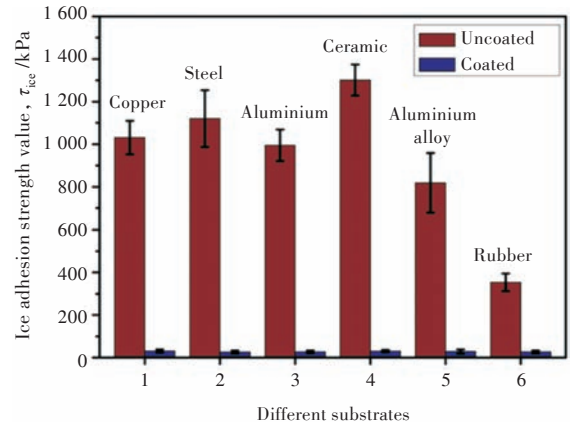

图5　各种表面涂覆防冰涂层前后在-15 ℃时的冰粘附强度比较[36]

Fig.5　Comparison of ice adhesion strength on different substrates before and after coated with the anti-icing coating at temperatures below -15 ℃[36]

Golovin等[37]通过在低交联密度的高弹性体涂层中接入可与其相溶的未交联的高分子使涂层—冰交界面可滑移,制作出拥有冰粘附强度极小、耐久性高的防冰材料。首先,研究了具有不同交联密度的一系列PDMS涂层,发现交联密度越低,冰粘附强度越低。然后,在低交联密度的PDMS涂层中接入硅油,发现接入硅油的低交联密度的PDMS涂层,冰粘附强度可减小到6±1 kPa,这是由于未交联的硅油可使冰和材料交界面产生滑移,极大降低了冰的附着力。为了得到最优的、高耐久性防冰涂层,制作了交联密度在0.68×10^{-5}~$1\ 203\times10^{-5}$ mol/cm^{3}的一系列疏冰涂层,包括PDMS,PU,FPU(含氟聚氨酯多元醇),PFPE(全氟聚醚)等,并嵌入硅酮、蔬菜油、鱼肝油或红花油。

如图6所示,嵌入质量分数为15%红花油的PU涂层初始冰粘附强度小于3 kPa,与加入质量分数20% fluoro POSS的FPU, NeverWet, NuSil R-2180以及SLIPS(润滑液注入多孔材料)相比,初始粘附强度极低。虽然PDMS(界面滑移),PDMS silane(界面滑移),PU(润滑)的初始粘附强度和10次结冰循环后的粘附强度与PU(界面滑移)相比相差不大,但是经过100次磨损循环后,上述材料的粘附强度都迅速增大,只有PU(界面滑移)的粘附强度仍然小于10 kPa,这表明PU(界面滑移)材料具有良好的耐磨性能。为了验证PU(界面滑移)的耐久性能,进行了一系列测试。在经过100次结冰循环、热循环、-30 ℃低温、腐蚀、酸碱、剥离、5 000次磨损等处理后,在-10 ℃下,涂

downloaded from www.ship-research.com

层冰粘附强度仍然不到10 kPa,而且在-30~-10 ℃温度区间内冰粘附强度基本不变,表明此类涂层在环境恶劣的极地地区具有较好的除冰效果。

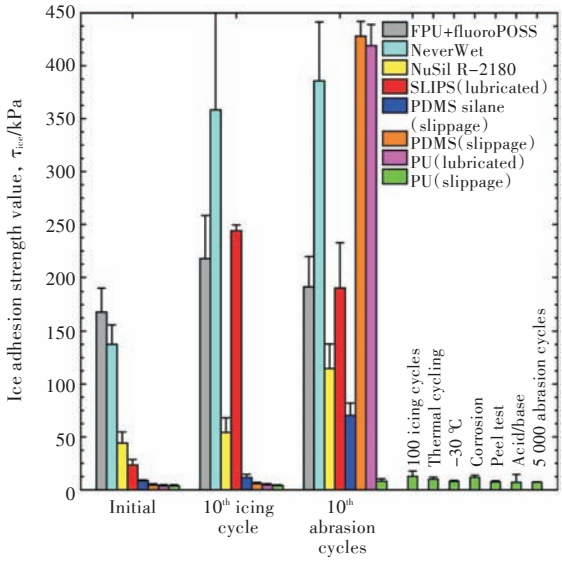

图6 低交联度界面滑移涂层与其他涂层冰粘附强度对比[37]

Fig.6 Comparison of ice adhesion strength of PU slippage coating with other ice-phobic surfaces[37]

4 结 语

本文对国内外极地航行船舶与海洋平台的防冰和除冰技术进行了综述,分析了覆冰对其不同部位和功能的影响。同时,介绍了国内外现有防冰和除冰方法及技术,重点分析了结构设计、表面涂层等防冰技术,以及超声导波等除冰技术,并对各类方法的适用性及优缺点进行评述和总结。比较而言,红外线、电加热、高速热流等主动除冰方法方便、快捷,但能耗较大,且存在二次结冰的风险;基于超声导波的智能除冰方法具有能耗低、除冰快和冷除冰的优势,是一种很有发展潜力的新型除冰技术,但是只适用于板管结构和较薄的冰层除冰;化学除冰方法和牺牲性涂层费用高、使用次数有限,且对极地环境有很大影响,应避免使用;超疏水涂层在一定条件下具有较小的冰粘附强度,在高湿、低温或水滴冲击情况下其疏水及防冰性能严重下降,需要进一步提高稳定性;水润滑涂层和低交联密度界面滑移涂层是新近开发、性能优异的防冰涂层技术,冰粘附强度极小,耐久性、环境适应性良好,具有很好的应用前景。总之,针对极地航行船舶和海洋平台,应根据使用特点并结合各种方法的优缺点,合理选择防冰和除冰方法。

参考文献:

[1] BIRD K J, CHARPENTIER R R, GAUTIER D L, et al. Circum-arctic resource appraisal: estimates of undiscovered oil and gas north of the arctic circle[R]. Reston, VA: The Uninted States, Geological Survey (USGS) National Center, 2008.

[2] GAUTIER D L, BIRD K J, CHARPENTIER R R, et al. Assessment of undiscovered oil and gas in the arctic [J]. Science, 2009, 324(5931): 1175-1179.

[3] 朱英富,刘祖源,解德,等.极地船舶核心关键基础技术现状及我国发展对策[J].中国科学基金,2015(3):178-186.
ZHU Y F, LIU Z Y, XIE D, et al. Advancements of the core fundamental technologies and strategies of China regarding the research and development on polar ships[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2015(3): 178-186 (in Chinese).

[4] JONES K F, ANDREAS E L. Sea spray icing of drilling and production platforms: ERDC/CRREL TR-09-3 [R]. Hanover, NH: US Army Corps of Engineerings, Engineer Research and Development Center & Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 2009.

[5] HORJEN I. Ice accretions on ships and marine structures[R]. Trondheim, Norway: The River and Harbour Laboratory, 1989.

[6] BATTISTI L, FEDRIZZI R, BRIGHENTI A, et al. Sea ice and icing risk for offshore wind turbines [C]// Proceedings of the OWEMES 2006. Citavecchia, Italy: [s.n.], 2006.

[7] SAMUELSEN E M, LØSET S, EDVARDSEN K. Marine icing observed on KV Nordkapp during a cold air outbreak with a developing polar low in the Barents sea [C]//Proceedings of the 23rd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. Trondheim, Norway: [s.n.], 2015.

[8] HORJEN I. Offshore drilling rig ice accretion modeling including a surficial brine film [J]. Cold Regions Science and Technology, 2015, 119: 84-110.

[9] RYERSON C C. Superstructure spray and ice accretion on a large U.S. Coast Guard cutter [J]. Atmospheric Research, 1995, 36(3/4): 321-337.

[10] JONES K F, ANDREAS E L. Sea spray concentrations and the icing of fixed offshore structures [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2012, 138(662): 131-144.

[11] MAKKONEN L. Atmospheric icing on sea structures: AD-AI44 448[R]. Hanover, NH: US Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1984.

[12] RYERSON C C. Ice protection of offshore platforms [J]. Cold Regions Science and Technology, 2011, 65 (1): 97-110.

[13] CAMMAERT G. Marine icing on arctic offshore opera-

downloaded from www.ship-research.com

tions[R]. [S.l.]: Maritiem Innovatie Platform, 2013.

[14] WOLD L E. A study of the changes in freeboard, stability and motion response of ships and semi-submersible platforms due to vessel icing [D]. Stavanger: University of Stavanger, 2014.

[15] GAUTHIER G P, COURTAY A, REBEIZ G M. Microstrip antennas on synthesized low dielectric-constant substrates [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1997, 45(8): 1310-1314.

[16] 薛国善. 船舶冬季防冻防滑工作[J]. 世界海运, 2013, 36(3): 30-31.

[17] RYERSON C C. Assessment of superstructure ice protection as applied to offshore oil operations safety: ERDC/CRREL TR-08-14 [R]. Hanover, NH: US Army Corps of Engineerings, Engineer Research and Development Center & Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 2009.

[18] Polarcus vessel photos [DB/OL]. (2015-02-17) [2016-05-09]. http://www.polarcus.com/media/1290/polarcus-alima-lr.jpg.

[19] 陆煊, 崔玫, 曹洪波, 等. 船舶防冻除冰技术现状与发展[J]. 船海工程, 2016, 45(2): 37-39.
LU X, CUI M, CAO H B, et al. Present situation and development of de-icing and prevent frostbite technology of ships [J]. Ship & Ocean Engineering, 2016, 45(2): 37-39 (in Chinese).

[20] VILLENEUVE E, HARVEY D, ZIMCIK D, et al. Piezoelectric deicing system for rotorcraft [J]. Journal of the American Helicopter Society, 2015, 60(4): 1-12.

[21] PALACIOS J, SMITH E, ROSE J, et al. Instantaneous de-icing of freezer ice via ultrasonic actuation [J]. AIAA Journal, 2011, 49(6): 1158-1167.

[22] WÅHLIN J, KLEIN-PASTE A. The effect of common deicing chemicals on the hardness of compacted snow [J]. Cold Regions Science and Technology, 2015, 109: 28-32.

[23] WÅHLIN J, LEISINGER S, KLEIN-PASTE A. The effect of sodium chloride solution on the hardness of compacted snow [J]. Cold Regions Science and Technology, 2014, 102: 1-7.

[24] 王冠, 张德远, 陈华伟. 飞机防冰—从传统到仿生的发展[J]. 工业技术创新, 2014, 1(2): 241-250.
WANG G, ZHANG D Y, CHEN H W. The development of aircraft anti-icing--from traditional to bionic [J]. Industrial Technology Innovation, 2014, 1(2): 241-250 (in Chinese).

[25] AYRES J, SIMENDINGER W H, BALIK C M. Characterization of titanium alkoxide sol-gel systems designed for anti-icing coatings: I. Chemistry [J]. Journal of Coatings Technology and Research, 2007, 4(4): 463-471.

[26] WONG T S, KANG S H, TANG S K Y, et al. Bioinspired self-repairing slippery surfaces with pressure-stable omni-phobicity [J]. Nature, 2011, 477(7365): 443-447.

[27] 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.

[28] LEE J W, HWANG W. Exploiting the silicon content of aluminum alloys to create a superhydrophobic surface using the sol-gel process [J]. Materials Letters, 2016, 168: 83-85.

[29] LEI H, XIAO J, ZHENG L P, et al. Superhydrophobic coatings based on colloid silica and fluorocopolymer [J]. Polymer, 2016, 86: 22-31.

[30] PENG P P, KE Q P, ZHOU G, et al. Fabrication of microcavity-array superhydrophobic surfaces using an improved template method [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2013, 395: 326-328.

[31] HUANG Y, SARKAR D K, CHEN X G. Superhydrophobic aluminum alloy surfaces prepared by chemical etching process and their corrosion resistance properties [J]. Applied Surface Science, 2015, 356: 1012-1024.

[32] WANG Y Y, XUE J, WANG Q J, et al. Verification of icephobic/anti-icing properties of a superhydrophobic surface [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2013, 5(8): 3370-3381.

[33] MEULER A J, SMITH J D, VARANASI K K, et al. Relationships between water wettability and ice adhesion [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2010, 2(11): 3100-3110.

[34] FARHADI S, FARZANEH M, KULINICH S A. Anti-icing performance of superhydrophobic surfaces [J]. Applied Surface Science, 2011, 257(14): 6264-6269.

[35] LEE C, NAM Y, LASTAKOWSKI H, et al. Two types of Cassie-to-Wenzel wetting transitions on superhydrophobic surfaces during drop impact [J]. Soft Matter, 2015, 11(23): 4592-4599.

[36] DOU R M, CHEN J, ZHANG Y F, et al. Anti-icing coating with an aqueous lubricating layer [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2014, 6(10): 6998-7003.

[37] GOLOVIN K, KOBAKU S P R, LEE D H, et al. Designing durable icephobic surfaces [J]. Science Advances, 2016, 2(3): e1501496.

downloaded from www.ship-research.com