

李志军, 王智群, 王庆凯, 等. 浮冰界面融化速率参数化方案的实验室研究[J]. 海洋学报, 2021, 43(7): 162–172. doi:10.12284/hyxb2021115
Li Zhijun, Wang Zhiquan, Wang Qingkai, et al. Laboratory study on parameterization of ice floe melt rate at ice-air and ice-water interfaces[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(7): 162–172. doi:10.12284/hyxb2021115

浮冰界面融化速率参数化方案的实验室研究

李志军¹, 王智群¹, 王庆凯¹, 解飞¹, 卢鹏^{1*}

(1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 融冰季节时天然浮冰表面、底面和侧向融化共存, 三者融化速率是底面大于侧向, 侧向大于表面。而且浮冰尺寸越小, 侧向速率占比越高。为了解决将小尺度浮冰块尺度指标计入融化参数化方案, 在低温环境实验室无辐射、无流速、控制气温和水温条件下对天然海冰和人工冻结淡水冰的圆盘试样, 开展了不同初始水温 and 不同初始直径的圆盘试样融化过程实验, 获得了圆盘试样直径、厚度和质量融化过程。依据这些实验数据, 构建试样直径厚度比这一新指标, 通过物理分析和数学统计手段, 建立了海冰和淡水冰试样表面、底面融化速率同温度梯度, 侧向融化速率和温差以及直径厚度比的关系式。这些关系式能够应用于天然直径 100 m 范围内浮冰的融化参数化方案, 期望能解决北冰洋海冰和入海口近岸淡水冰夏季融化季节能量和质量平衡数值模拟的需求。

关键词: 北极海冰; 侧向融化; 参数化; 实验研究

中图分类号: P731.15

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2021)07-0162-11

1 引言

随着全球变暖的加剧, 北极夏季海冰正呈现出面积萎缩和厚度逐渐变薄^[1]、多年冰比例减小^[2]、海冰漂移能力增强^[3]等特征。海冰的演变归结于大气、海冰、海洋三者之间的能量和物质交换平衡。反过来, 北极海冰的变化又能引发它对气候和天气的效应。最终北极海冰产生类似南极海冰的作用, 影响北极乃至北半球的生态系统^[4]、物质平衡^[5]与资源开发^[6]等。

掌握北极海冰变化的各种物理关键过程和描述这些过程的数学方法是必要的。但是受恶劣环境条件的限制, 海冰现场观测数据从覆盖时间上、面积上、内容上均显得偏少。目前解决大气-海冰-海洋的复杂相互作用只能依靠数值模式来实现大面积的宏观表象, 之后再逐渐增加对物理、化学、生物等细节过程的理解, 再逐步引入到模型, 不断地完善。在

过去的二十几年, 国内外学者将海冰模式从简单向复杂, 从单因子向多因子发展。但包括各种观测手段和过程并能用数学描述的精细模型仍在发展之中^[7]。特别是因资源利用的需求^[8], 需要适合地球科学的模型向生产应用的微观尺度模型发展。可是北极海冰的快速变化, 又引起海冰内部物理性质的变化^[8], 从而加大了海冰模式物理参数化方案的不确定性。

海冰内部物理性质的变化, 归属于海冰融化和减少过程中的内部表现。在自然界海冰厚度的减薄必然伴随着冰层在外部和内部作用力下的破碎。之后大面积连续的冰层向浮冰块发展。如果出现浮冰块, 即使冰块拼接在一起的总面积不发生变化, 但是冰块侧向接触海水的面积增加。按照比表面积的概念, 海冰的厚度是米级, 一旦冰块尺寸到了米级, 侧面浸水面积就和底面浸水面积同量级, 这时浮冰的侧向融化占比将大大增加。因此理解北极夏季海冰融化, 不仅

收稿日期: 2021-02-19; 修订日期: 2021-04-03。

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFA0605901); 国家自然科学基金(41922045, 41906198, 41876213); 中央高校基本科研业务费(DUT20GJ206, DUT19LAB08)。

作者简介: 李志军(1960—), 男, 河北省崇礼县人, 教授, 主要从事冰物理和力学性质研究。E-mail: lizhijun@dlut.edu.cn

* 通信作者: 卢鹏(1981—), 男, 教授, 主要从事海冰物理行为研究。E-mail: lupeng@dlut.edu.cn

需要考虑到冰块尺寸、表面融池这些一般和特殊现象的机理^[9-10],而且需要积极探索侧向融化的机理。

现场调查是获得海冰侧向融化物理过程和关键物理机制的重要手段,但是受现场条件和测试技术的限制,目前已开展的北极海冰的侧向融化现场观测试验较少。20世纪80年代,Hall和Rothrock^[11]使用拍摄技术对浮冰的侧向边界变化进行航拍监测,获取浮冰表面侧向融化信息。之后,Perovich等^[12]在SHEBA(Surface Heat Budget of the Arctic Ocean)项目期间观测了海冰的侧向融化过程。它的测量间隔时间约为10d,得到平均侧向融化速率接近6.4cm/d,这个速率与研究区的天气、海洋条件相关。在中国第三次北极科学考察中,利用超声传感器和自制的特别支架完成冰间水道侧向和底面融化过程监测^[13],得到的侧向融化速率仅为1.0cm/d。尽管中国第三次北极科学考察具有气象、海洋水文环境参数,但受限于现场观测的时段、站点布置等困难性,没有实现将所有观测数据归一到相同时间节点,建立起侧向融化速率同环境条件的数值关系。但从中认识到极地海冰侧向融化过程研究需要从稳定的冰层出发,首先探索观测技术、观测结果和环境条件的关系,之后将技术应用到北极。在时间有限的冰站作业中获得最大量的数据。为此利用国内稳定的湖冰,试验了不同技术方法,并应用所获得的数据进行侧向融化参数化研究^[14-15]。这些湖冰原型实验体现了气温、辐射、水温对侧向融化的综合贡献,存在理解单一因子对侧向融化贡献的困难。首先用低温环境实验室模拟的固定冰单侧融化过程^[16],建立了无辐射、无风环境下气温同侧向融化速率的关系。这与天然浮冰同时存在表面、底面和侧面的融化情况存在差异。本文在原型观测、文献成果和

侧向融化参数化模型的基础上,针对浮冰表面、底面和侧向融化,改进实验方案,获得它们的融化过程并建立相应的参数化方案。

2 实验研究的理论基础

在浮冰区域,海冰块体的周边布满水道和裂缝,在平面上成为冰、水相间的格局。一般认为:冰间水道在竖直方向上,它与大气和冰下海洋相互作用,进行能量交换;在水平方向上,它与海冰侧面相互作用,造成海冰侧向融化^[17]。浮冰本身同时表面与大气接触、底面与海水接触,构成冰-水界面多方向的能量交换共存情景,这时的气-冰-水相互作用的方式变得更为复杂,如图1^[18]。

文献[17]结果表明,在北极海冰整体的融化过程中,底面融化占总量的2/3,表面融化占总量的近1/3,而侧向融化占总融化不到10%。但是如果使用准确的数学描述建立精细数学模型的话,就不论每项贡献量的多寡,都需要这些物理过程的数学表达式。如果这些复杂的或者多元的物理过程采用数学上的归一化措施,就存在物理过程的忽略、归并或者简化。反之,就需要在认识物理过程及其贡献大小的基础上,进行数学分解。之后,再对参数化方案进行各种验证。

海冰的侧向融化所需要的热量来自于冰间水道的水温,而浮冰周边的水温变化主要源于气-水界面的热交换,目前也认识到有一部分来自大洋^[19]。无论大气和海洋如何驱动冰间水道的水温变化,冰间水道吸收的净能量一部分贡献于海冰底部融化,另一部分贡献于海冰侧向融化^[20]。Perovich^[21]发现帕特里克王子岛西北地区冰间水道的水平与垂直温度梯度较小,对应的融化速率也小。Maykut和Perovich^[22]详细地

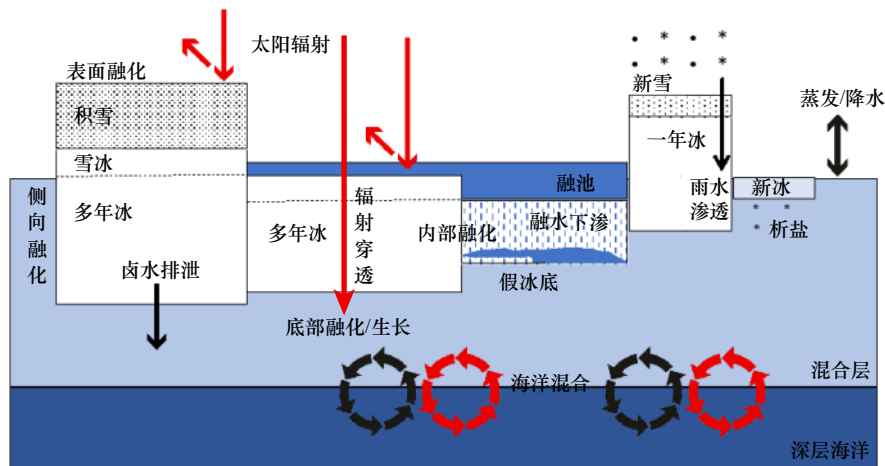


图1 冰间水道侧向融化物理过程

Fig. 1 Lateral melt physical process between leads

描述了冰间水道中的能量交换过程。文献 [21–22] 均采用将侧向融化速率表述为幂函数形式, 即

$$W_{\text{lat}} = a\Delta T^b, \quad (1)$$

式中, W_{lat} 为浮冰侧向融化速率; ΔT 为冰-水侧向界面温差; a, b 均为统计系数。

Steele^[23] 提出了基于海冰密集度的浮冰表面、底面和侧向融化公式

$$\frac{d}{dt}(AH) = A \left(W_{\text{sur}} + W_{\text{bot}} + \frac{\pi H}{\mu L_D} W_{\text{lat}} \right), \quad (2)$$

式中, A 为区域海冰密集度; W_{sur} 为冰表面融化速率; W_{bot} 为冰底面融化速率; H 为浮冰厚度; L_D 为等效直径; μ 为经验参数 ($\mu = 0.66$), 其他符号同前。对于较小的海冰, W_{sur} 与 W_{bot} 可忽略不计, 所以有

$$H \frac{dA}{dt} = A \frac{\pi H}{\mu L_D} W_{\text{lat}}, \quad (3)$$

式中, 符号同前。并认为浮冰等效直径小于 30 m, 受到侧向融化的影响非常显著。

本文实验采用类似天然情况的浮冰试样, 实验过程同时存在表面、底面和侧向融化。实验获得的直径变化只是试样表面位置的侧向融化; 厚度变化数据是表面融化和底面融化的综合体现; 质量变化数据是三者的综合体现。图 2 给出浮冰融化过程中表面、底面、侧面热通量和融化过程中热量平衡示意图。

为了将综合结果中的各个过程分离出来, 进行单项因子分析, 因此需要建立实验数据分析的基础理论。假设浮冰块在融化前, 其自身的热量平衡已经完成, 整个浮冰块的温度达到熔点; 由空气温度梯度决定的表面融化和冰下水体温度梯度决定的底面融化, 分别是气-冰界面和冰-水界面上导热通量和冰融化潜热的平衡。对于表面融化速率, 则有

$$W_{\text{sur}} = \left(\frac{\lambda_a}{\rho_i L} \right) \frac{\Delta T_a}{\Delta h_a}, \quad (4)$$

浮冰底面的融化速率则为^[24]

$$W_{\text{bot}} = \left(\frac{\lambda_w}{\rho_i L} \right) \frac{\Delta T_w}{\Delta h_w}, \quad (5)$$

式中, λ_a 为空气导热系数; λ_w 为水的传导热系数; ΔT_a 为浮冰表面上方温差; ΔT_w 为浮冰底面下方温差; Δh_a 为浮冰表面上方温度探头到浮冰表面的距离; Δh_w 为浮冰底面下方最近温度探头到浮冰底面的距离; ρ_i 为浮冰块密度; L 为浮冰块融化潜热, 其他符号同前。

浮冰侧向融化在物理机制的区别是从冰侧面到水体一定范围内, 不存在温差。因此它是界面的热交换, 考虑到低温环境实验室内不存在太阳辐射和水体流动, 因此只有相同深度水温差的热交换。按照界面热交换理论, 浮冰的侧向融化速率为

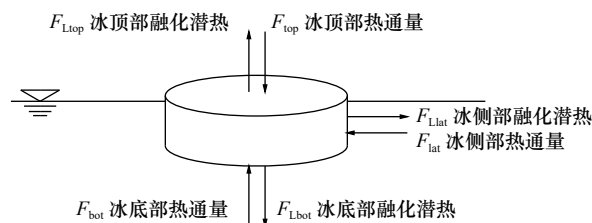


图 2 浮冰块融化的表面、底面、侧面热量平衡

Fig. 2 Thermal balance between the ice-air on surface, ice-water on bottom and lateral surface of a floe

$$W_{\text{lat}} = \left(\frac{\rho_w \alpha}{\rho_i L} \right) \Delta T, \quad (6)$$

式中, α 为冰-水热交换系数; ρ_w 为水密度, 其他参数同前。考虑到侧向等效圆的侧向面积, 实验数据统计分析使用国际报道文献 [21] 和 [22] 的形式, 即式(4)。

3 实验技术和过程

3.1 实验装置、实验冰样和过程

总结大连理工大学模拟冰内硝基苯冰内滞留量的物理模拟技术^[25]和淡水冰单侧侧向融化实验技术^[16], 在低温环境实验室内建立一个长 2 m, 宽 1 m, 高 0.8 m 的水槽。在水槽中间高度 0.5 m 位置安装一个相机, COOLPIX P6000, 像素为 1 350 万。拍摄的照片上每个像素对应 0.5 mm×0.5 mm。根据实验进程选择 30~3 600 s 一帧的拍摄间隔。在水槽的底部安放高精度 (± 0.1 mm) 冰下超声测距仪。以上两项均作为实验的辅助技术, 相机跟踪圆盘试样表面直径变化, 超声测距仪用来跟踪某一圆盘试样底面位置的变化。其目的是为了避免人工测量出现异常值时, 解释产生的原因。

实验水槽内装水 0.50 m 深。水槽上方气温和水温联合影响试样的融化过程, 因此从水槽上方空气到水槽水体, 沿深度方向布置了 pt100 温度探头。温度探头直径为 5 mm, 使用 4 芯硅胶线缆传输信号, 具有防水能力。所有温度探头出厂前已校正精度, 满足测温精度 0.1℃ 要求, 显示温度到 0.01℃。空气温度探头分别布置在水面以上 50 cm 和 3 cm 高度处; 水温探头分别布置在距水面 0 cm、2 cm、4 cm、6 cm、8 cm、10 cm、20 cm、30 cm、40 cm、50 cm 深度处。整个实验装置示意图见图 3。

实验使用两种冰样, 黄海天然海冰和人工冻结淡水冰。黄海天然冰于 2021 年 1 月 4–6 日取自大连夏家河海岸, 为冰厚约 30 mm 的搁浅平整冰, 运回实验室, 用锯骨机和车床加工成直径约为 65 mm、90 mm、120 mm、150 mm、190 mm 的圆盘试样。人工冻结淡

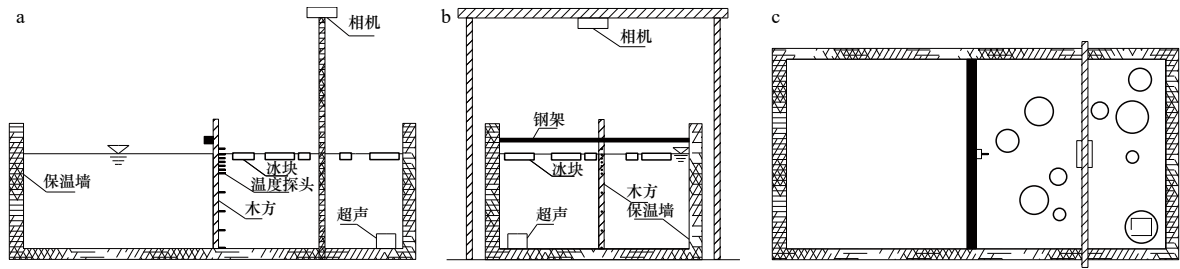


图3 实验室装置系统的正面(a), 侧面(b)和俯视(c)示意图

Fig. 3 The schematic of laboratory equipment system of front view (a), side view (b) and top view (c)

水冰采用侧向冰点水温恒温技术, 保证制备冰样单向冻结。将单向冻结的粗冰样, 用车床加工成直径约为 65 mm、90 mm、120 mm、150 mm、190 mm, 厚度约为 30 mm 的圆盘试样。两种冰的晶体均符合天然冰, 海冰为典型的粒状冰, 其实测平均密度为 800 kg/m^3 , 平均盐度为 6.04。淡水冰为典型的柱状冰, 其实测平均密度为 900 kg/m^3 。两种冰的晶体照片见图 4。

通过调节低温环境实验室气温, 保证水槽水温的相对稳定。实验使用的海水为用海盐配制的咸水。咸水的盐度根据文献 [26] 报道的北极夏季海冰区调查的海洋温盐剖面的中值配制, 实测咸水的盐度为 27.7。实验使用的淡水为自来水。实验前水槽恒定的初始设计水温随海冰实验和淡水冰实验变化。海冰试样的初始设计水温为 -0.5°C 、 0°C 、 0.5°C 、 1.0°C 、 1.5°C 。淡水冰实验的初始设计水温为 0.5°C 、 1.5°C 、 2.0°C 、 3.0°C 。

每组实验将 5 个不同直径的圆盘试样同时放入, 并且用带有不同颜色和数字的标签贴纸放在部分试样上, 用来区识别别。试验跟踪每个圆盘试样的直径、厚度和质量变化。整个冰样融化过程由人工测量和电子测试辅助技术同步进行。在每组实验的初期, 冰块融化较少, 冰块的侧向融化、厚度融化和质量融化都直接测量, 可视监测和超声波测距跟踪数据用于核验人工测量异常点的产生原因。因此, 冰试样当中还放入了 1 块直径为 10 cm 的泡沫圆盘和 1 块边

长为 10 cm 的正方形泡沫方盘, 作为拍摄监测的参考, 同时作为不同时刻冰试样表面等效直径的标定。超声传感器的上方保证有 1 块圆盘试样。相机和超声设置每 10 min 记录 1 次数据。

整个实验过程监测气温、水温和冰温, 保持融化期间水温基本稳定变化, 观测其融化过程。实验前和实验期间圆盘冰样厚度和表面直径使用 0.01 mm 的电子游标卡尺测量。质量使用电子秤称重。

3.2 实验结果

实验前, 对每一试样用电子游标卡尺测试 3 次不同位置的直径和 3 处不同位置的厚度, 计算得到试样平均初始直径和平均初始厚度。两种实验试样的初始尺寸信息汇总在表 1。

在整个实验过程中, 低温环境实验室内没有太阳辐射和风对流引起的热量交换。只有室内气温作为控制水和冰热交换的驱动因子。为了保证整个实验过程中冰吸收水体热量发生侧向和底面融化, 初始设计水温高于实验过程水温。整个实验过程中, 低温环境实验室的气温具有: (1) 制冷系统引起的温度控制波动; (2) 每日制冷系统的规定除霜的升温“脉冲”; (3) 长期过程的气温稍有升高。图 5a 以初始设计水温 1.0°C 的海冰圆盘试样实验为例, 给出实验过程中的水面以上 3 cm 位置的气温变化历程。

实验从 2021 年 1 月 19 日 13:30 开始, 到 21:30 结束。实验开始前, 首先通过不断搅拌, 将水槽内水温

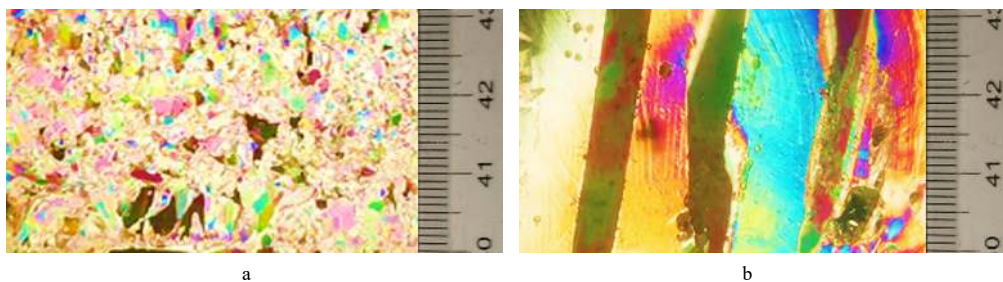


图4 海冰(a)和淡水冰(b)圆盘试样冰内部晶体

Fig. 4 The inner crystals of ice specimens of sea ice from Yellow Sea (a) and artificial fresh water ice (b)

表 1 各试样实验前初始尺寸参数
Table 1 Preliminary parameters of ice specimens

参数	海冰					淡水冰				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
设计初始水温/℃	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
初始平均直径/mm	68.94	92.95	124.51	154.45	185.85	68.16	90.91	119.96	154.84	191.90
初始厚度/mm	32.59	34.48	35.95	35.54	34.47	30.85	30.66	30.73	30.22	30.87
设计初始水温/℃	0	0	0	0	0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
初始平均直径/mm	69.41	88.61	122.77	154.15	191.62	67.86	89.43	119.08	153.19	192.50
初始厚度/mm	36.64	36.67	35.69	31.69	36.77	31.00	31.19	30.30	29.60	31.23
设计初始水温/℃	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
初始平均直径/mm	68.77	97.42	122.98	154.53	194.45	67.45	90.42	118.91	153.01	191.00
初始厚度/mm	31.92	41.90	36.03	36.11	39.48	30.91	30.40	30.59	30.57	31.47
设计初始水温/℃	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
初始平均直径/mm	69.64	88.08	124.36	152.82	193.82	67.61	89.52	120.03	153.19	191.03
初始厚度/mm	38.82	37.27	35.66	40.46	38.05	30.89	30.21	30.46	30.90	30.57
设计初始水温/℃	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5					
初始平均直径/mm	66.95	94.93	126.87	155.86	193.29					
初始厚度/mm	28.78	32.86	35.29	32.54	34.07					

均匀降至 1.0℃, 然后以距水面 3 cm 处的气温低于 1.0℃ 再保持一段时间, 让水温稳定不变。然后在水槽放入圆盘试样, 此时环境实验室气温也因冰样吸热开始下降, 但随制冷机的工作, 有 0.4℃ 幅度的规律性波动。并在 17:30 有短期除霜引起的气温“脉动”。

试样融化吸收水体热量, 引起从水面到冰层浸入深度范围内的水温下降。在气温的调节下, 水体同深度的温度也相对下降, 但在冰融化吸热的作用下, 冰下水体随深度的温度梯度在逐步增加。同样以初始设计水温为 1.0℃ 的海冰圆盘试样实验为例, 图 5b 给出对应的水温变化历程。图 5b 记录了 2021 年 1 月 19 日包含实验段的水温变化特征, 随着试样融化水温降低; 当冰样全部融化后, 水温和气温保持稳定之后开始上升。

从图 5 中可以看到实验期间气温变化的频率和幅度较大, 水温较为稳定。从图 5b 的水温色阶图可以看出, 在 1 月 19 日 14:00 之前水温已经搅拌均匀, 达到了实验设计初始水温 1.0℃ 左右, 在色阶图上显示的黄颜色。放入所有冰样后, 表面水温下降比较快, 但是下层水温降温比较慢。19 日 18:00 前水温变化比较剧烈, 整个实验过程水温分层梯度比较明显,

水深 2 cm 到 4 cm 的降温比较快, 这与冰块厚度 3 cm 有关。

融化实验过程中记录了不同直径圆盘试样的表面直径、厚度和质量的变化。整个实验过程中, 实验初期, 冰圆盘变化较小。每次测量时, 将冰盘从水面轻轻取出, 放在电子秤上称重, 用电子游标卡尺测量厚度和表面直径, 底面和其他部位的直径不易测量, 见图 6。测量的时间间隔根据实验的水温和冰块融化速率决定。对于设计初始水温 1.0℃ 实验, 实际水温较高, 因此测量时间间隔大约为 1 h, 尽可能减少因人工测试对实验结果的影响。

图 7 给出设计初始水温 1.0℃ 海冰实验不同直径圆盘试样的直径、厚度和质量变化过程。图 7a 绘出冰样融化过程中表面直径的变化。从图中可以看出, 同样刚开始时, 由于吸热滞后现象, 直径减小缓慢。但随着历时增加, 试样直径融化速率增加。图 7b 绘出圆盘试样厚度上的变化。它随着历时的增加, 试样厚度融化速率先快后慢, 逐步趋于稳定。各个直径试样的厚度融化速率基本相同。从图 7c 中可以看出, 随着历时的增加, 圆盘试样的质量总体在减小。初期因试样非封闭气泡孔隙较大, 刚入水后, 咸水渗入, 试

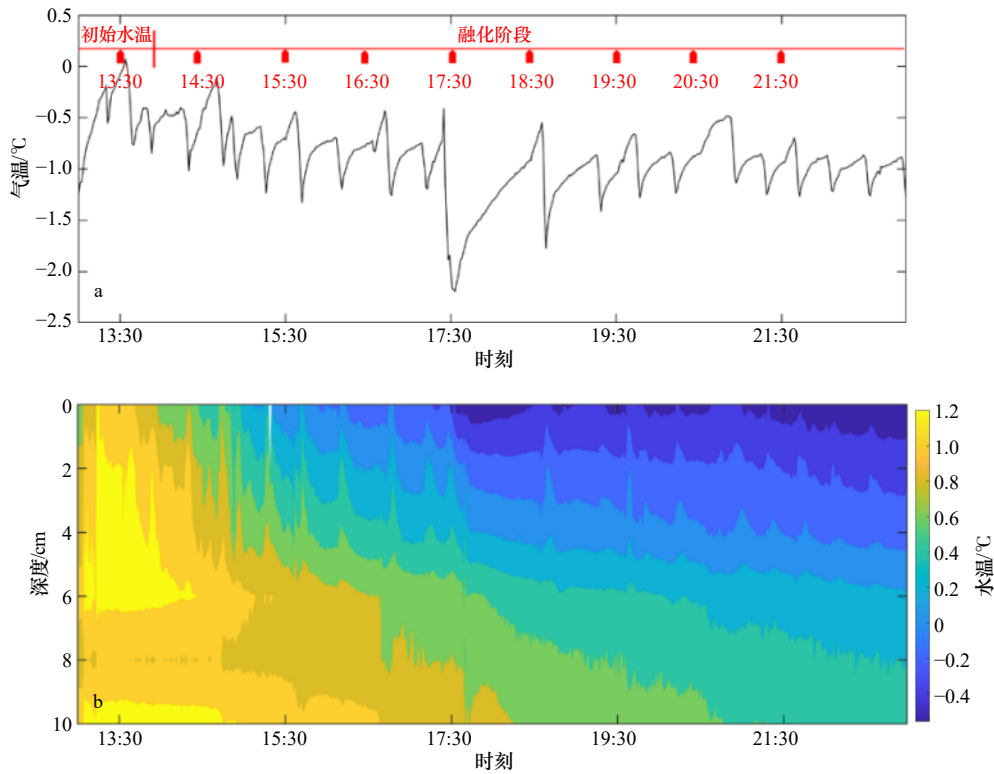


图5 2021年1月19日设计水温为1°C的海冰圆盘试样实验的气温(a)和水温(b)变化过程

Fig. 5 The air (a) and water temperature (b) variation processes of the tested specimens of sea ice at designed preliminary water temperature of 1.0°C on January 19, 2021

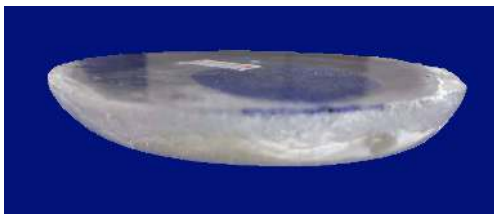


图6 初始直径120 mm圆盘试样侧向融化外形 (2020年9月20日 08:46)

Fig. 6 The lateral shape of a melted ice specimen of preliminary diameter of 120 mm (08:46, September 20, 2020)

样质量出现增加。

纵观其他4组海冰和3组淡水冰不同设计初始水温的圆盘试样实验结果,也有类似趋势。无需在此赘述。

此外,圆盘试样侧面融化受到水内不同深度处温差控制,整个冰样不同水深处的融化量不同。自然界一般是表面和底面处融化最大。但低温环境实验室缺少太阳辐射和风,完全依靠气温调节水温,因此它的水内温度梯度大,而且一致性强(图5b)。因此,随着圆盘试样浸入水深的增加,水-冰温差增大,圆盘的融化量增加,形成“单调递减型”(图6),也类似文献[15-16]的报道。实验还观测到由于海冰试样密度

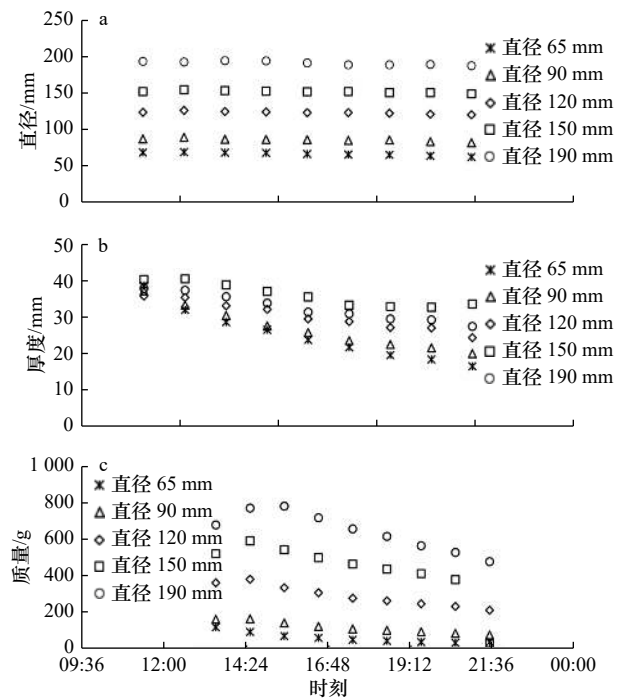


图7 设计初始水温为1.0°C海冰圆盘试样实验的直径(a)、厚度(b)、质量(c)变化过程

Fig. 7 The variation processes of diameters (a), thicknesses (b) and masses (c) of the tested specimens of sea ice at designed preliminary water temperature of 1.0°C

小,孔隙率大,导致融到最后海冰表面融化成絮状;水下部分侧向融化速率大,表面部分侧向融化速率小;上表面边缘突出,冰块融到后期比较薄,不再是圆形。这种现象完全符合海冰融化速率大于淡水冰的特征。

4 实验结果和冰-水界面融化速率参数化方案

根据文献 [17], 北极浮冰的融化速率从大到小依次为: 底面融化、表面融化、侧向融化。在低温环境实验室内, 由于没有太阳辐射和风的作用, 圆盘试样的表面融化比底面更慢。但它们的融化速率因实验室内温度梯度比北极天然情况的大, 而会大于北极浮冰的实际情形。而侧向融化所占比例相对增加, 但仍然小于圆盘试样底面融化速率。在圆盘试样融化实验过程中, 浮冰厚度随着融化而减薄, 也就是它的底面在水内的位置和表面在空气中的位置是变化的, 而实验室布置的空气和水内温度探头位置不变。这样在数据分析过程中, 根据圆盘试样的厚度变化和实测海冰和淡水冰试样的平均密度 (800 kg/m^3 和 900 kg/m^3) 估算试样表面和底面到布置在空气和水内温度探头的距离。对应圆盘试样热量平衡时的温度, 海冰假设为液体冰, 其纯冰晶体占绝大部分。从物理化学角度出发, 其冰点温度和熔点温度不同 [27], 融化温度是一个范围。最低温度假设比海水冰点温度稍低, 即 -1.5°C 。最高温度比纯冰晶体熔点温度稍低, 即 -0.2°C 。淡水冰假设为纯水冰, 其冰点和熔点相同, 为 0°C 。依此计算圆盘试样表面的空气温度梯度和底面的水温度梯度。

因为表面气温波动频率高, 圆盘试样表面融化在厚度融化中所占比例较小, 因此按式(4)和式(5)的理论将厚度融化速率分解成表面融化速率和底面融化

速率。在除霜期间和制冷停止瞬间的气温波动, 因为时间短, 视为不能引起表面快速融化或冻结。但在个别情况中, 计算的温度梯度会出现负值, 剔除这些实验数据。对表面融化速率和底面融化速率分别进行统计。其中表面融化速率统计结果见图 8, 底面融化速率的统计结果见图 9。

根据图 8, 海冰和淡水冰浮冰块的表面融化速率参数化方案是式(7)和式(8); 它们的底面融化速率的参数化方案是式(9)和式(10)。这些参数化可以应用于北冰洋大部分夏季海冰覆盖区和北冰洋几条入海河口的近岸淡水或低盐度浮冰的融化过程, 如流入楚科奇海的麦肯齐河和科雷马河; 流入东西伯利亚海的科雷马河、亚纳河和勒拿河; 流入拉普捷夫海的勒拿河; 流入喀拉海的鄂毕河和叶尼塞河等 [28]。需要注意的是实验室气温波动的频率高, 幅度大, 因此数据的分散性较大。某种方面降低了表面融化速率参数化方案的置信度, 建议将式(7)和式(8)作为参考。由未来进一步的稳定控温环境的实验结果和现场结果做订正。式(9)和式(10)在北极长期观测数据的基础上直接验证即可。

$$W_{\text{sur,sea}} = 0.0405 \frac{\Delta T_a}{\Delta h_a} + 0.7347 \quad r = 0.5542, \quad (7)$$

$$W_{\text{sur,fresh}} = 0.0002 \frac{\Delta T_a}{\Delta h_a} \quad r = 0.7654, \quad (8)$$

$$W_{\text{bot,sea}} = 0.0672 \frac{\Delta T_w}{\Delta h_w} + 0.1817 \quad r = 0.7989, \quad (9)$$

$$W_{\text{bot,fresh}} = 0.0529 \frac{\Delta T_w}{\Delta h_w} \quad r = 0.8185, \quad (10)$$

式中, 下角标 sea, fresh 分别表示海冰和淡水冰; 侧向融化速率单位采用 mm/h ; 温差单位采用 $^\circ\text{C}$; 距离单位采用 m 。其他符号同前。

式(7)至式(10)是式(4)和式(5)的具体体现。如果按照冰厚度 1.5 m 反演浮冰尺寸, 试样范围达到等

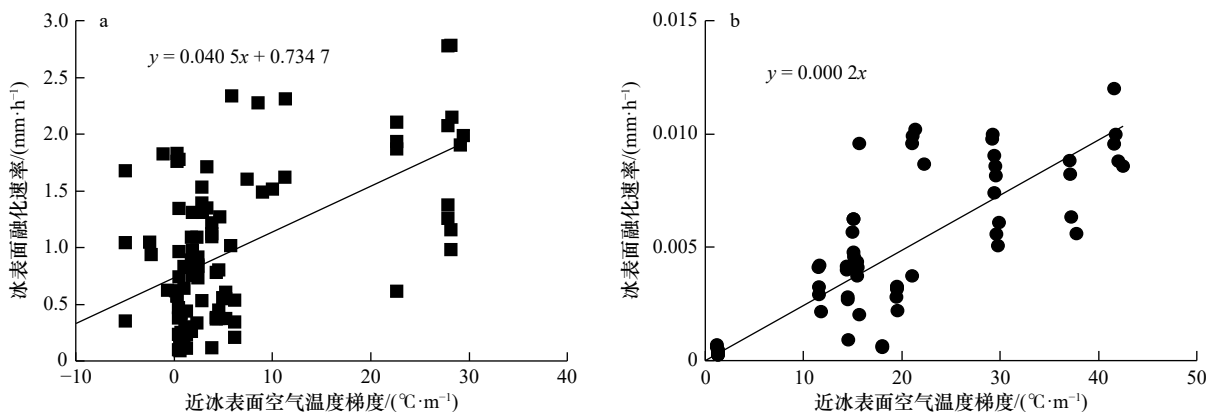


图 8 海冰(a)和淡水冰(b)圆盘浮冰表面融化速率同温度梯度的拟合关系

Fig. 8 The statistical relations between surface melting rate and temperature gradient in specimens of sea ice (a) and freshwater ice (b)

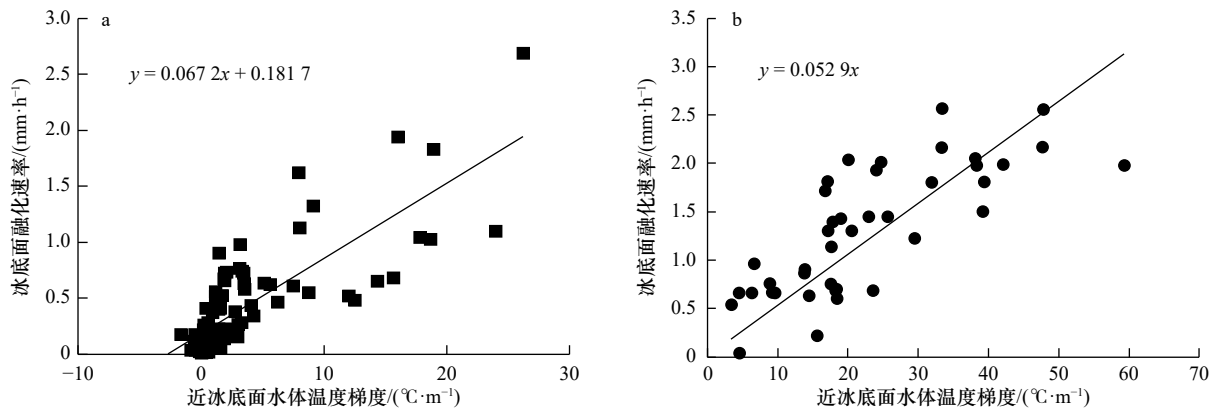


图9 海冰(a)和淡水冰(b)圆盘浮冰底面融化速率同温度梯度的拟合关系

Fig. 9 The statistical relations between bottom melting rate and temperature gradient in specimens of sea ice (a) and freshwater ice (b)

效浮冰尺度 10 m。根据理论, 这个是表面和底面热通量问题, 与浮冰块的尺度无关, 因此在天然情况只要根据气象和海洋的水文气象环境要素获得界面的热通量, 就能利用式(7)至式(10)评估北冰洋海冰区和入海口近岸淡水浮冰的表面和底面热融化速率。此外, 根据热力学理论, 浮冰表面和底面的热通量受温度梯度控制, 上述参数化表达式没有浮冰尺寸限制。

实验中人工测量和视频监测的均是试样表面直径变化, 其他位置不易测量。因此实验侧向融化实验结果统计分析中, 利用水面处水温和冰试样热平衡融点的温差。为了体现浮冰尺寸对侧向融化速率的效应, 将冰样直径厚度比作为新的指标, 引入到参数化方案。采用浮冰直径(L_D)与厚度(H)之比, 它能够实现实验室测试结果同现场结果的统一; 并且将实验室针对直径 10 m 以内浮冰参数化方案弥补到浮冰直径小于 30 m 的需求^[23]。根据文献 [17] 的现场浮冰表面、底面和侧向融化所占比例, 可以拓展到浮冰直径小于 100 m 的应用。当浮冰直径大于 100 m, 侧向融

化同样存在, 但是占比很小。也就是计入浮冰尺寸效应的侧向融化参数化方案更适应于北冰洋浮冰边缘区。

将海冰和淡水冰圆盘试样实验结果人工测试数据中温度梯度负值和瞬间温度梯度变化对应测试数据剔除, 海冰有效数据 86 组, 淡水冰有效数据 58 组。利用 Datafit 软件, 写入预判参数化方案表达式, 拟合结果见图 10。

根据图 10a 的拟合结果, 圆盘海冰侧向融化的参数化方案是:

$$W_{\text{lat, sea}} = 0.534\Delta T^{1.337} + \frac{2.637}{L_D/H} - \frac{9.145}{(L_D/H)^2} \quad (200 \geq L_D/H \geq 6) \\ r = 0.8273. \quad (11)$$

根据图 10b 的拟合结果, 圆盘淡水冰侧向融化的参数化方案是:

$$W_{\text{lat, fresh}} = 0.573\Delta T^{1.326} + \frac{2.361}{L_D/H} - \frac{5.246}{(L_D/H)^2} \quad (200 \geq L_D/H \geq 6) \\ r = 0.6323, \quad (12)$$

式中, 符号和下角标同前。

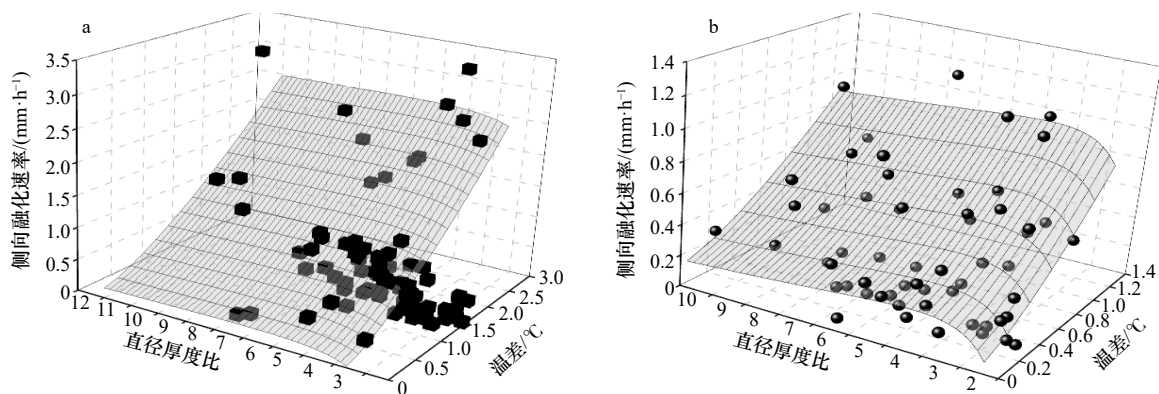


图10 侧向融化速率与海冰(a)和淡水冰(b)浮冰圆盘试样侧边水温差和直径厚度比的统计关系

Fig. 10 The statistical relations between lateral melting rate and temperature difference, ratio of diameter and thickness of specimens of sea ice (a) and freshwater ice (b)

浮冰块侧向融化实验参数化方案反演到原型浮冰的尺度在 10 m 量级;根据理论分析可以扩展到 100 m 量级。扩展的基本依据是:如果单纯看待浮冰尺度参数,则 L_D 越大, L_D/H 越大,浮冰块融化速率相对越低,这符合目前国内外学者报道的成果。事实上自然界的浮冰在直径上的尺度范围很大,从千米级到米级,而厚度上的尺度范围只是米级。可是冰厚度方向上的融化速率大于 90%,侧向融化速率小于 10%。如果选择直径作为浮冰尺寸参数引入参数化方案中,它不能体现浮冰块的整体损失,而 L_D/H 是一个理想参数。在式(11)和式(12)中,第一项和国际学者的表达式相同^[21-23]。后两项表达侧向融化速率随着 L_D/H 的变化而变化。在 L_D/H 的变化中,只有 L_D/H 小于 200,后两项在数值上才能体现出 L_D/H 变化的贡献。如果 L_D/H 小于 6,在实验室缺少动力条件下可以实验,但在自然界罕见。考虑到浮冰表面、底面、侧面同时发生融化, L_D/H 效应不能采用单调函数。本文选择了 $y=a/x+b/x^2$ 形式,对 $y<6$ 的情形忽略,这就从数学表述上既反映当浮冰块较小时,侧向融化速率可以不计,同时又能反映当水温温差相同时,冰块越大,侧向融化速率越小的物理机制。

式(11)利用海冰的实验结果,得到北极海冰侧向融化参数化方案。其第一项的系数分别是 0.534 和 1.337。其中系数 1.337 同国际文献建议的 1.36 接近,系数 0.534 是一个受制于环境条件和选择单位的系数,它需要未来极地观测数据校正。式(12)的系数 0.573 和 1.326 同海冰的处于相同量级,但稍小。这是淡水冰不含有卤水通道,密度较大,融化较慢的表现。这一现象,在文献[16]中也类似。同样该式主要适应于北冰洋入海口海岸附近的浮冰。

5 结论与讨论

浮冰表面、底面和侧向融化同时发生,无论自然界引起冰融化的热源来自哪里,最终引起融化的是冰-

水界面的水体温度。因此,建立了冰-水界面融化速率同水温或者温差的关系就能够实现浮冰融化参数化方案。其他自然因素引起的水温变化可以视为该核心参数化的外围产品。根据实验室实验建立的浮冰融化参数化方案的特点有:

(1)浮冰表面融化速率由近表面气温到冰面温度梯度决定;底面融化速率由近底面水温到冰底温度梯度决定。在相同温度梯度下,表面融化速率低于底面融化速率。尽管融冰季节空气温度梯度远高于水体温度梯度,但是表面融化速率仍然远低于底面融化速率。国际上目前对表面融化忽略,本文参数化方案尽管数据分散,海冰与淡水冰偏离较大,但可以反映出继续通过高精度气温控制实验室研究和现场数据验证的表面融化速率参数化方案是可行的,同时在理论上反映表面和底面融化速率参数化方案不受浮冰直径的影响。

(2)侧向融化速率由不同深度冰-水界面温度和水温的温差,浮冰直径厚度比控制。引入的浮冰直径厚度比能够体现浮冰直径越小时侧向融化速率越大的现象,它能够体现浮冰直径小于 100 m 时的冰块尺寸效应。对于直径大于 100 m 的浮冰,侧向融化体现不出随着直径变小融化速率增加的特点。

(3)侧向融化速率参数化方案能够解释现场浮冰融化季节近表面直径大,底面直径小的原因。

(4)海冰因密度小、卤水通道大,相对淡水冰的融化速率大。海冰和淡水冰的侧向融化速率与国际上报道的参数化方案接近。这两种参数化方案可以用于北冰洋浮冰边缘融化的数值模拟,也可以用于北冰洋入海口近岸淡水浮冰块融化的数值模拟。

(5)考虑到北极夏季海冰融化的复杂性,尽管本文获得的海冰侧向融化机理是有效的,但未来还需要增加更多实验来解决北极不同情形的海冰融化。此外,室内实验还需要解决同时观测浮冰表面融化和底部融化的技术。

参考文献:

- [1] 柯长青,王蔓蔓.基于CryoSat-2数据的2010-2017年北极海冰厚度和体积的季节与年际变化特征[J].海洋学报,2018,40(11):1-13. Ke Changqing, Wang Manman. Seasonal and interannual variation of thickness and volume of the Arctic sea ice based on CryoSat-2 during 2010-2017[J]. Haiyang Xuebao, 2018, 40(11): 1-13.
- [2] 王蔓蔓,柯长青,邵珠德.基于CryoSat-2卫星测高数据的北极海冰体积估算方法[J].海洋学报,2017,39(3):135-144. Wang Manman, Ke Changqing, Shao Zhude. Arctic sea ice volume estimation method based on CryoSat-2 satellite altimeter data[J]. Haiyang Xuebao, 2017, 39(3): 135-144.
- [3] Kwok R, Spreen G, Pang S. Arctic sea ice circulation and drift speed: Decadal trends and ocean currents[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(5): 2408-2425.
- [4] Li Zhijun, Li Runling, Wang Zipan, et al. Upper limits for chlorophyll *a* changes with brine volume in sea ice during the austral spring in the Weddell Sea, Antarctica[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2016, 35(2): 68-75.

- [5] Screen J A, Simmonds I. The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification[J]. *Nature*, 2010, 464(7293): 1334–1337.
- [6] Mager D. Climate change, conflicts and cooperation in the Arctic: Easier access to hydrocarbons and mineral resources?[J]. *The International Journal of Marine and Coastal Law*, 2009, 24(2): 347–354.
- [7] 王松, 苏洁, 储敏, 等. BCC_CSM对北极海冰的模拟: CMIP5和CMIP6历史试验比较[J]. 海洋学报, 2020, 42(5): 49–64.
Wang Song, Su Jie, Chu Min, et al. Comparison of simulation results of the Arctic sea ice by BCC_CSM: CMIP5 and CMIP6 historical experiments[J]. *Haiyang Xuebao*, 2020, 42(5): 49–64.
- [8] Wang Qingkai, Lu Peng, Leppäranta M, et al. Physical properties of summer sea ice in the Pacific Sector of the Arctic during 2008–2018[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2020, 125(9): e2020JC016371.
- [9] Lu Peng, Li Zhijun. A method of obtaining ice concentration and floe size from shipboard oblique sea ice images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(7): 2771–2780.
- [10] Huang Wenfeng, Lu Peng, Lei Ruibo, et al. Melt pond distribution and geometry in high Arctic sea ice derived from aerial investigations[J]. *Annals of Glaciology*, 2016, 57(73): 105–118.
- [11] Hall R T, Rothrock D A. Photogrammetric observations of the lateral melt of sea ice floes[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1987, 92(C7): 7045–7048.
- [12] Perovich D K, Grenfell T C, Richter-Menge J A, et al. Thin and thinner: Sea ice mass balance measurements during SHEBA[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(C3): 8050.
- [13] 雷瑞波, 李志军, 程斌, 等. 夏季北冰洋浮冰-水道热力学特征现场观测研究[J]. 极地研究, 2010, 22(3): 286–295.
Lei Ruibo, Li Zhijun, Cheng Bin, et al. Observations on the thermodynamics mechanism of the floe-lead system in the Arctic Ocean during summer[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2010, 22(3): 286–295.
- [14] 王庆凯, 李志军, 曹晓卫, 等. 实测冰-水侧向界面热力学融化速率[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(6): 81–86.
Wang Qingkai, Li Zhijun, Cao Xiaowei, et al. Analysis of measured thermodynamic melting rate of lateral interface between ice and water[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2016, 14(6): 81–86.
- [15] 王庆凯, 方贺, 李志军, 等. 湖冰侧、底部融化现场观测与热力学分析[J]. 水利学报, 2018, 49(10): 1207–1215.
Wang Qingkai, Fang He, Li Zhijun, et al. Field investigations on lateral and bottom melting of lake ice and thermodynamic analysis[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49(10): 1207–1215.
- [16] 艾润冰, 谢涛, 刘彬贤, 等. 基于气温的浮冰侧向融化速率参数化方案实验研究[J]. 海洋学报, 2020, 42(5): 150–158.
Ai Runbing, Xie Tao, Liu Binxian, et al. An experimental study on parametric scheme of lateral melting rate of ice layer based on temperature[J]. *Haiyang Xuebao*, 2020, 42(5): 150–158.
- [17] Tsamados M, Feltham D, Petty A, et al. Processes controlling surface, bottom and lateral melt of Arctic sea ice in a state of the art sea ice model[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2015, 373(2052): 20140167.
- [18] 刘骥平, 雷瑞波, 宋米荣, 等. 适应极地快速变化海冰模式的研发与挑战[J]. 大气科学学报, 2021, 44(1): 12–25.
Liu Jiping, Lei Ruibo, Song Mirong, et al. Development and challenge of sea ice model adapting to rapid polar sea ice changes[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2021, 44(1): 12–25.
- [19] Zhao Jinping, Gao Guoping, Jiao Yutian. Warming in Arctic intermediate and deep waters around Chukchi Plateau and its adjacent regions in 1999[J]. *Science in China Series D (Earth Sciences)*, 2005, 48(8): 1312–1320.
- [20] Parkinson C L, Washington W M. A large-scale numerical model of sea ice[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1979, 84(C1): 311–337.
- [21] Perovich D K. On the summer decay of a sea ice cover[D]. Seattle: University of Washington, 1983.
- [22] Maykut G A, Perovich D K. The role of shortwave radiation in the summer decay of a sea ice cover[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1987, 92(C7): 7032–7044.
- [23] Steele M. Sea ice melting and floe geometry in a simple ice-ocean model[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97(C11): 17729–17738.
- [24] 陈晓东, 王安良, Knut H, 等. 海冰盐度影响下冰水热力过程的试验研究[J]. 海洋通报, 2019, 38(1): 38–46.
Chen Xiaodong, Wang Anliang, Knut H, et al. Study of the influence of sea ice salinity on the thermodynamics[J]. *Marine Science Bulletin*, 2019, 38(1): 38–46.
- [25] Li Zhijun, Wang Xin, Li Qingshan, et al. Study on nitrobenzene ratio in water-ice system under different conditions[J]. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2008, 51(11): 2013–2020.
- [26] 赵进平, 史久新, 金明明, 等. 楚科奇海融冰过程中的海水结构研究[J]. 地球科学进展, 2010, 25(2): 154–162.
Zhao Jinping, Shi Jiuxin, Jin Mingming, et al. Water mass structure of the Chukchi Sea during ice melting period in the Summer of 1999[J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(2): 154–162.
- [27] Overduin P P, Kane D L, Van Loon W K P. Measuring thermal conductivity in freezing and thawing soil using the soil temperature response to heating[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2006, 45(1): 8–22.
- [28] 秦恺, 张瑜, 高郭平, 等. 北冰洋入海径流变化状况及其与近岸海冰关系[J]. 极地研究, 2019, 31(4): 371–382.
Qin Kai, Zhang Yu, Gao Guoping, et al. Variation of Arctic Ocean runoff and its correlation with coastal sea ice[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2019, 31(4): 371–382.

Laboratory study on parameterization of ice floe melt rate at ice-air and ice-water interfaces

Li Zhijun¹, Wang Zhiqun¹, Wang Qingkai¹, Xie Fei¹, Lu Peng¹

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: During the ice melting season, the surface, bottom and lateral melting of natural ice floes coexist, and the melting rate of the three is that the melting rate of the bottom is greater than the lateral, and the lateral is greater than the surface. And the smaller the ice floe size, the higher the proportion of lateral velocity. In order to solve the problem of including the small-scale ice floe scale indicators into the melting parameterization plan, in the low-temperature environment laboratory without radiation, no flow rate, controlled air temperature and water temperature, the disk samples of natural sea ice and artificially frozen fresh water ice were carried out. Experiments on the melting process of disc samples with different initial water temperatures and different initial diameters were carried out. Obtain the disc sample diameter, thickness and mass melting process. Based on these experimental data, a new indicator of sample diameter-to-thickness ratio was constructed. Through physical analysis and mathematical statistics, the melting rate of the surface and bottom surface of the sea ice and freshwater ice sample was established with the temperature gradient, the lateral melting rate, temperature difference, and diameter. The relationship between the thickness ratio. These relationships can be applied to the melting parameterization scheme of floating ice within a natural diameter range of 100 m. It is expected to solve the demand for numerical simulation of the energy and mass balance of the summer melting season of Arctic sea ice and coastal freshwater ice at the sea estuary.

Key words: Arctic sea ice; lateral melting; parameterization; laboratory study