

贾磊, 姜令强, 卢鹏, 等. 冰-水侧向融化过程的实验室试验研究[J]. 海洋学报, 2023, 45(2): 42–50, doi:10.12284/hyxb2023011

Jia Lei, Jiang Lingqiang, Lu Peng, et al. Laboratory experimental study on the lateral melting process of ice layer[J]. Haiyang Xuebao, 2023, 45(2): 42–50, doi:10.12284/hyxb2023011

# 冰-水侧向融化过程的实验室试验研究

贾磊<sup>1</sup>, 姜令强<sup>1</sup>, 卢鹏<sup>1\*</sup>, 解飞<sup>1</sup>, 祖永恒<sup>1</sup>, 王庆凯<sup>1</sup>, 李志军<sup>1</sup>

(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:** 为了探究冰层侧向融化过程, 定量分析影响冰层侧向融化的主导因素, 在低温实验室水槽内实施了浮冰融化实验。同步测量了冰底面和表面消融过程、浮冰侧向融化过程, 同时记录了实验室气温、冰样内部不同深度处的冰温及开阔水域不同深度处的水温, 利用相关分析方法研究了不同要素之间的关系及其对浮冰侧向融化速率的影响规律。结果表明, 融冰前期冰样内部不同深度处的侧向融化缓慢且均匀, 平均融化速率为 0.05 mm/h; 融冰中后期不同深度处的侧向融化速率显著增加且不再均匀, 平均融化速率为 0.15 mm/h。平均侧向融化速率与气温的相关系数较好 ( $r=0.82$ ), 优于其与平均水温 ( $r=0.74$ ) 和水-冰温度差 ( $r=0.48$ ) 的相关系数。建立侧向融化速率随温度 (气温、水温) 和深度变化的定量关系, 可以准确描述浮冰侧向融化过程的非均匀性。同时验证了进行非均匀性侧向融化试验技术的可行性, 为更加接近北极真实情况考虑风速和光源条件的海冰试验奠定了基础。

**关键词:** 侧向融化速率; 温度; 水深; 参数化; 低温试验

中图分类号: P731.15

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2023)02-0042-09

## 1 引言

北极是地球的三大寒极之一<sup>[1]</sup>, 在北半球气候系统中占有着举足轻重的地位。进入 21 世纪以来, 全球气温持续升高, 全球变暖已经成为不争的事实<sup>[2-3]</sup>。北极夏季更多太阳辐射直接到达海洋表面, 从而引起冰雪的表面融化及海洋升温<sup>[4]</sup>, 加速了海冰的消融并使北极海冰变薄<sup>[5-7]</sup>。北极较薄的海冰拥有更低的强度, 在风浪的作用下大尺寸浮冰更容易发生弯曲破坏, 进而断裂成多个小尺寸浮冰; 而小尺寸浮冰拥有更多与海水接触的侧向面积, 使浮冰的侧向融化行为更为显著<sup>[8]</sup>。因此, 国内外学者对冰-水界面侧向融化过程的研究越来越重视。

Zobuv<sup>[9]</sup> 最早注意到海冰侧向融化对冰层衰退的影响, 首次提出描述海冰侧向融化的参数化方案。

Josberger<sup>[10]</sup> 依托于实验室内盐水环境下的冰融化物理模型试验, 考虑冰-水温度差并提出了平均侧向融化速率的参数化方案。Perovich<sup>[11]</sup> 依托于天然冰间水道开展试验研究, 根据观测值对 Josberger 的平均垂直侧向融化速率参数化方案进行了修正。Steele<sup>[12]</sup> 考虑到浮冰几何形状和大小对侧向融化的影响, 根据观测试验和数值模拟引入了浮冰尺寸的相关参数, 改进了 Perovich<sup>[11]</sup> 提出的海冰侧向融化速率参数化方案, 后续支撑了李志军等<sup>[13]</sup> 的研究。国内最早关于北冰洋浮冰-水道热力学系统的现场观测在 2008 年开展, 雷瑞波等<sup>[14]</sup> 观测并记录了水道两侧浮冰侧向轮廓的变化, 但其现场观测数据较少, 未能建立侧向融化速率的参数化方案。王庆凯等<sup>[15-16]</sup> 在内蒙古自治区的乌梁素海人工开凿开敞水域模拟冰间水道观测系统, 观测该湖泊在融冰期间开敞水域处的冰-水侧向剖面

收稿日期: 2022-05-07; 修订日期: 2022-08-24。

基金项目: 国家自然科学基金(41876213, 41922045); 辽宁省兴辽英才计划项目(XLYC2007033); 国家重点研发计划(2018YFA0605901)。

作者简介: 贾磊(1998—), 男, 河北省邢台市人, 主要从事海冰物理研究。E-mail: Jialei9805@mail.dlut.edu.cn

\* 通信作者: 卢鹏, 教授, 主要从事极地海冰变化研究。E-mail: lupeng@dlut.edu.cn

变化,建立了由水温和净太阳辐射共同影响的融化速率参数化模型;但因野外实验气象条件难以控制,导致融化期存在负温天气,且重复性不足。艾润冰等<sup>[7]</sup>在低温实验室的水池中模拟了人工冻结冰在纯热力学、无辐射、无风、静水条件下的冰层侧向融化,最后建立了气温与侧向融化速率的参数化模型。但这些年现场观测与实验室试验只关注侧面平均融化速率,没有考虑海冰侧面融化过程的竖向不均匀性,无法准确体现海冰侧向边界的变化过程;同时在试验中只关注气象或者水文条件对融化速率的影响,没有考虑侧向融化中气温、水温和冰温的同步变化过程。

为了弥补上述研究不足,本文在低温实验室内开展冰-水侧向界面融化过程的物理模型试验,同步记

录了冰试样的融化过程以及气-冰-水的温度场变化,通过分析实验结果明确了侧向融化过程中的温度场同步变化规律,并揭示了侧向融化的不均匀性。

## 2 试验装置与方案

冰-水侧向界面融化过程试验在大连理工大学低温实验室水槽中进行,试验水槽上方开敞,其余5个面覆盖8 cm厚绝热保温层。试验采用人工冻结淡水冰开展,分为结冰期和融冰期。试验过程中对冰试样的底面生消过程、冰-水侧向界面融化过程、气-冰-水温度变化过程进行同步观测。水槽试验仪器布置图如图1所示。

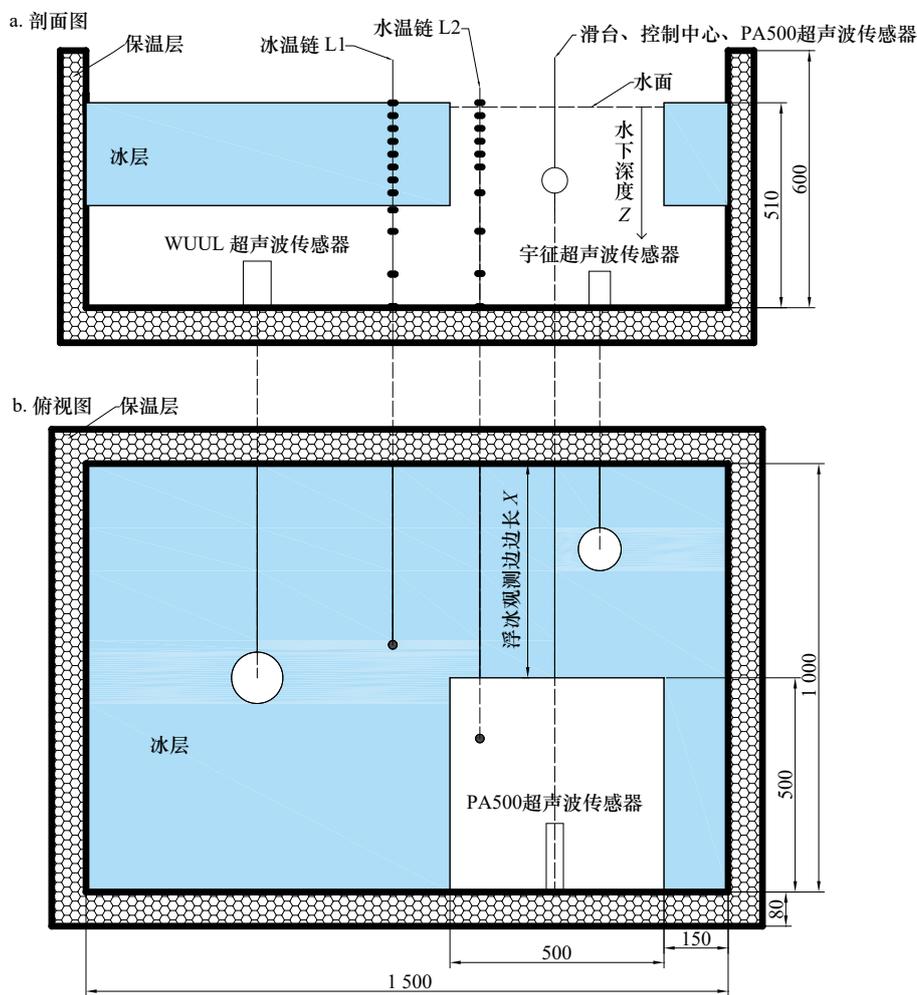


图1 实验装置示意图(单位: mm)

Fig. 1 Schematic diagram of experimental device (unit: mm)

### 2.1 冰底面生消观测系统和冰温链装置

为了观测结冰期和融冰期冰层底部的变化以及记录不同冰层处的冰温,水槽注水前在水槽底部固定两个超声测距传感器用于测量实验期间的冰厚变化,

WUUL 超声波传感器的测量范围是 0.1~20 m,分辨率为 1 mm,测量精度为 2 mm。宇征超声波传感器的测量范围是 0.1~1 m,分辨率为 1 mm,测量精度为 5 mm。同时将冰温链 L1 固定在水槽中,用于测量整

个试验期间的冰温变化。试验采用的温度传感器为铂电阻 PT1000 温度传感器, 精度为  $0.03^{\circ}\text{C}$ , 探头长为  $1.5\text{ cm}$ 、直径为  $3\text{ mm}$ 、总线长为  $10\text{ m}$ 。冰温链 L1 共配置 13 个铂电阻温度传感器, 其中 1 个布置在实验室中央用于测量实验室气温, 其余 12 个分别预安装在冰面以下  $0\sim 0.5\text{ m}$  范围内。所有预先放置的设备固定在水槽之后, 对水槽进行注水。待水体稳定  $12\text{ h}$  之后, 对实验室进行降温。结冰期间实时远程监控, 待冰厚生长至  $24\text{ cm}$  时停止降温。此时冰面处于完全封冻状态, 人工用电链锯在水槽开凿一个  $50\text{ cm}\times 50\text{ cm}$  的开敞水域用于侧向融化观测。

## 2.2 冰-水侧向界面观测系统和水温链装置

为观测融冰期间冰-水侧向界面的消融过程和记录不同水深处的水温, 在开敞水域布置冰-水界面侧向融化观测系统, 由滑台导轨、运行控制中心、超声测距传感器 (Tritech PA500) 组成。通过运行控制中心控制导轨带动超声测距传感器按照设定的规律上下运动, 以测量水下不同深度处超声传感器到模型冰的距离, 从而获得模型冰侧向剖面。PA500 超声波测距传感器探头长度为  $16\text{ cm}$ , 分辨率为  $1\text{ mm}$ , 测距精度为  $2.5\text{ mm}$ , 量程为  $0.1\sim 10\text{ m}$ 。PA500 超声波测距传感器的初始入水深度为  $2\text{ cm}$ , 设置超声向下运动时在水面以下  $0.02\sim 0.22\text{ m}$  间每隔  $0.02\text{ m}$  处分别进行时长  $5\text{ min}$  的观测, 在观测完  $0.22\text{ m}$  处的点之后, 超声会缓慢上升到设置的第一个点位重新开始观测。在开敞水域处布置水温链 L2, L2 共配置 9 个温度传感器, 分别布置在水面以下  $0\sim 0.5\text{ m}$  范围内用于测量开敞水域不同深度处的水温, 现场设备布置如图 2 所示。

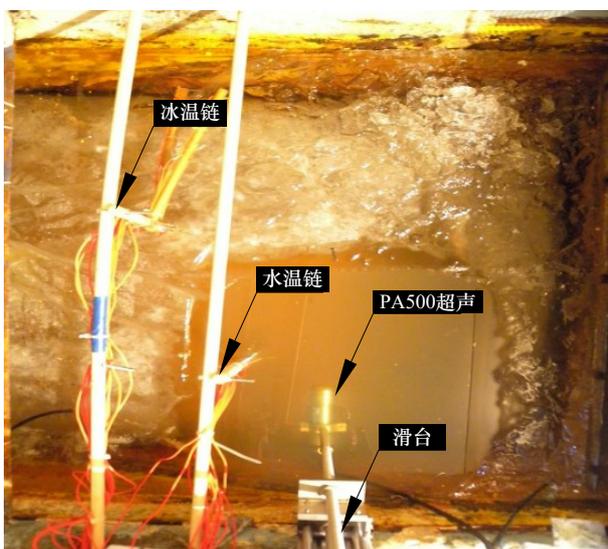


图 2 侧向融化观测装置图

Fig. 2 Schematic diagram of lateral melting observation device

本次试验的结冰期历时  $7\text{ d}$ , 融冰期历时  $14\text{ d}$ , 试验期间实验室的气温变化如图 3 所示。结冰期实验室气温维持在  $-10\sim -20^{\circ}\text{C}$ , 融冰期自 4 月 2 日开始; 但 4 月 7 日之后才逐渐产生显著的侧向融化, 因此以 4 月 7 日为时间节点将整个过程分为融冰前期和融冰中后期。融冰期开始, 实验室气温在  $10\text{ h}$  内从  $-17^{\circ}\text{C}$  左右升温到  $5^{\circ}\text{C}$ , 气温在融冰前期维持在  $4\sim 6^{\circ}\text{C}$ , 融冰中期维持在  $6\sim 8^{\circ}\text{C}$ , 融冰后期维持在  $8\sim 10^{\circ}\text{C}$ , 期间 4 月 7-8 日是由于实验室的其他原因造成的临时降温。试验期间同步测量冰底生消过程、实验室气温、冰-水侧向界面融化过程、冰样内部不同深度处的冰温和开敞水域不同深度处的水温。试验期间冰底部生消、冰-水侧向消融、气温、冰温、水温要素数据采样的时间间隔均为  $1\text{ min}$ 。

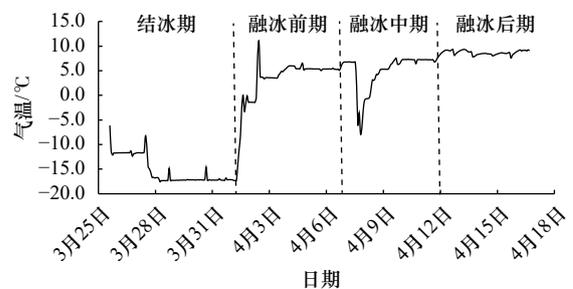


图 3 试验期间的气温变化

Fig. 3 Temperature change during the experiment

## 2.3 数据处理方法

首先将超声测距传感器在水下每个悬停位置处所测得的 5 个测量值取平均, 然后观察某一深度处的变化趋势剔除离散点, 再利用线性插值补充离散点, 最后通过中值滤波得到该深度处的精确测量值。结合滑台行程, 理论上可得到 11 个悬停位置处的测量值, 将这 11 个位置处的测量值连接起来便可得到该时间段的冰-水侧向界面的剖面, 不同时刻的侧向剖面进行排列, 即可得到冰-水侧向界面的剖面变化过程。考虑到侧向融化的尺度很小及超声测距传感器的测量数据存在一定的误差, 将每 10 个不同时刻 (约  $10\text{ h}$ ) 的整个纵向剖面的测量值取平均值, 作为该时间段内中间时刻的剖面测量值, 同时将每 10 个不同时刻所对应的该时间段内的气温、不同深度处水温及冰温取平均作为该时间段内中间时刻的温度要素值。为了将垂向冰温、水温与侧向融化速率在同一深度处相对应, 对冰温及水温在深度方向进行插值处理<sup>[7]</sup>。

## 3 试验结果

由于超声的工作原理, 在测量冰-水侧向界面位

置的过程中当其临近水面时会受到水面反射影响,在临近冰底时会受到冰-水侧向界面不平整的影响,因此超声传感器在最上层和最下层的测量值存在明显偏差。为减少结果分析误差,虽然生长末期冰厚达24 cm,数据分析中融冰前期只计入深度4~20 cm范围的测量值,融冰中后期只计入深度8~20 cm范围的测量值。

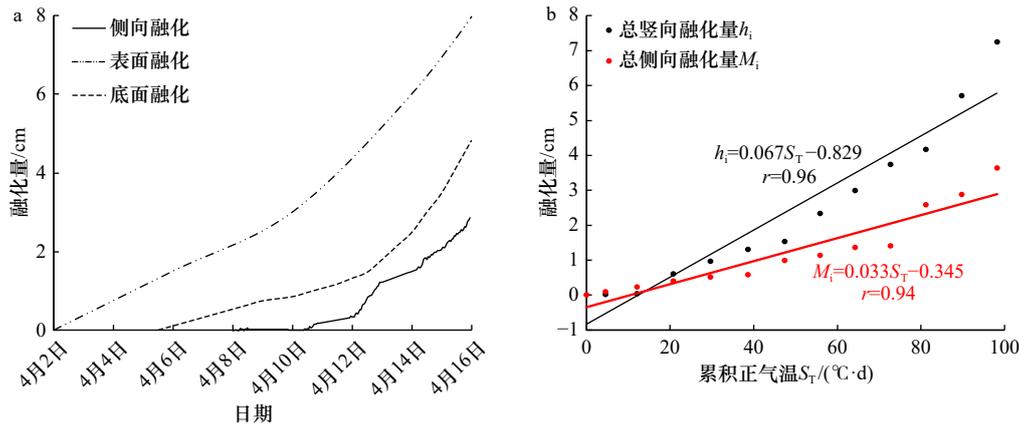


图4 侧向、底面以及表面融化量对比(a)和累积正气温与竖向及侧向融化量的关系(b)

Fig. 4 Comparison of lateral, bottom and surface melting (a) and relationship between cumulative positive air temperature and vertical and lateral melt (b)

表1 冰样三面融化对比

Table 1 Comparison of melting on three sides of the ice layer

冰样位置	融化厚度/cm	平均融化速率/( $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ )	融化体积占比/%
表面	8	0.24	57.7
底面	5	0.15	36.1
侧面	3	0.09	6.2

从图4a可以看出,冰样表面融化几乎在融冰期一开始便出现,这是因为冰试样上表面最先与升温的空气直接接触而产生融化。融冰开始3 d后底面融化逐渐出现,并且融化速率随着时间不断加快。明显的侧向融化现象出现的最晚,大约在融冰开始5 d之后才逐渐观测到了冰-水侧向剖面产生较大的变化。如表1所示,在同样的试验环境下,表面的平均融化速率要高于底面的平均融化速率,且二者均高于侧面的平均融化速率。相应的表面融化体积占比最高,为57.7%,底面的融化体积占比次之,为36.1%,侧面的融化体积占比最小,为6.2%。根据北极夏季海冰融化现有研究<sup>[12, 18]</sup>,海冰的侧面融化体积占比在5%~20%之间,因此本试验中的侧面融化量与现场情况相比偏低但仍在有效范围之内。

### 3.1 冰层融化过程

#### 3.1.1 侧向、底面及表层融化的对比

图4a给出了在整个融化过程中,冰层的侧向融化、底面融化及表面融化三者间的对比,图4b给出了累积正气温与总竖向融化量、总侧向融化量的拟合关系;对应的融化量、平均融化速率、融化体积占比见表1。

造成3个方向发生显著融化的时间及融化量不同的原因是控制因子的差异。虽然影响冰样融化速率的因素众多,但在实验的控制变量中,主要的差异包括:(1)冰样的表面融化受气温的影响,当气温高于冰点时表面融化就会发生。冰底面和侧面融化受水温的影响,而在融化后期底部水温逐渐升高(见3.2.2节)。此时,底面处的水温要比冰侧面接触的水温高,当底面和侧面的水温高于冰点时就会发生融化。(2)表面、底面、侧面与介质的接触面积不同,冰表面与空气接触的面积大致等于冰底面与水接触的面积,两者都远远大于冰侧面与水接触的面积。因此冰的表面融化最先发生,底面融化稍晚,侧向融化最后发生。

从图4b(黑点)可见,在融化过程中随着累积正气温的增加,冰样竖向融化量逐渐增大,与文献[19]提出的累积正气温( $S_T$ )与冰样消融过程的线性关系吻合良好( $r=0.96$ )。与此类似,冰样侧向融化量也随着累积正气温的增加逐渐增加(图4b中红点),且同样呈现为良好的线性关系( $r=0.94$ )。

#### 3.1.2 冰-水侧向界面融化

图5给出了融冰前期、融冰中后期冰-水侧向界面位置的变化。初始冰-水侧向界面剖面由人工切割

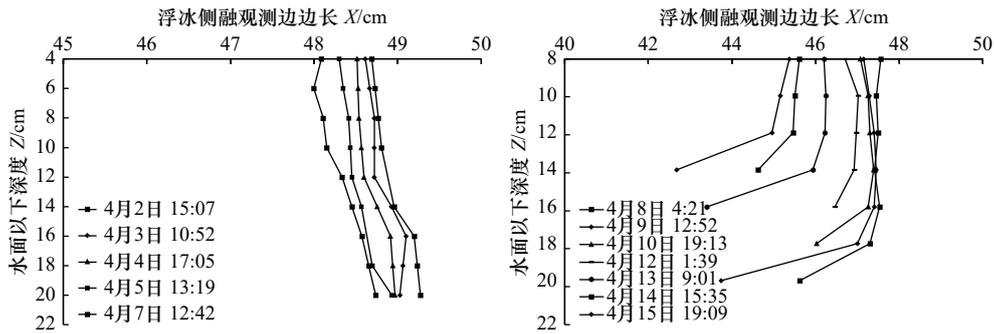


图 5 冰-水界面位置变化

Fig. 5 Variation of the lateral position of the ice layer

造成。融化期间在冰未脱离水槽边壁之前,冰样表面及底面不断融化导致水面与冰面的距离逐渐减小,为保持水面不超过冰面,多余水体会通过水槽侧面连通管自动排出。

由图 5 可知,融冰前期冰-水界面位置变化较为缓慢且均匀,平均侧向融化速率约为 0.05 mm/h,各垂向深度处的冰面较为平整,不存在明显的冰侧曲面。融冰中后期冰-水界面位置变化较快且存在明显梯度,平均融化速率约为 0.15 mm/h,侧向融化速率显著加快,侧向冰面不再平整,中下层的侧向融化速率逐渐快于中上层。需要说明的是,由于冰层与水槽连接处经历了较为剧烈的融化,使得冰层于 4 月 10 日早上 5 时前后与边壁分离,冰样在水浮力的作用下发生缓慢的抬升,10 h 内冰样由与侧壁固结变为漂浮状态。为防止出现零点漂移,此时调整侧向超声观测的初始点位于冰-水界面处继续观测。

### 3.2 温度场的变化

#### 3.2.1 冰温

试验期间冰下 0~25 cm 处的冰温变化趋势如图 6

所示,黑色实线代表冰底面位置。结冰期间,上层冰温(0~6 cm)受气温影响较大,中层冰温(9~15 cm)及下层冰温(18~25 cm)受气温影响相对不敏感,保持稳定升高,冰层内沿深度方向存在约 1℃/cm 的温度梯度。随着冰厚的增加,冰层生长速度减小。融冰期间,实验室升温之后各层冰温升高至 0℃ 共用时 10 h 左右,升温过程相对较快,并且各层冰温同时升高无明显滞后性,融冰前期各层冰温均稳定维持在 0℃ 左右。融冰中期各层冰温的下降,与实验室的临时气温突变有关。融冰后期冰样表层融化显著,使部分温度探头直接与空气接触,已通过零点位置修正从图中剔除。

#### 3.2.2 水温

融冰期在开敞水域内,水下 0~50 cm 的水温变化趋势如图 7 所示,上层(0~5 cm)水温受气温影响较大,波动明显且与气温的变化趋势非常相近,无明显滞后性。中间层水体(6~21 cm)水温受气温影响较小且未观测到明显的分层现象。底层(30~50 cm)水温受气温影响最小,但在融冰中后期反常增加,部

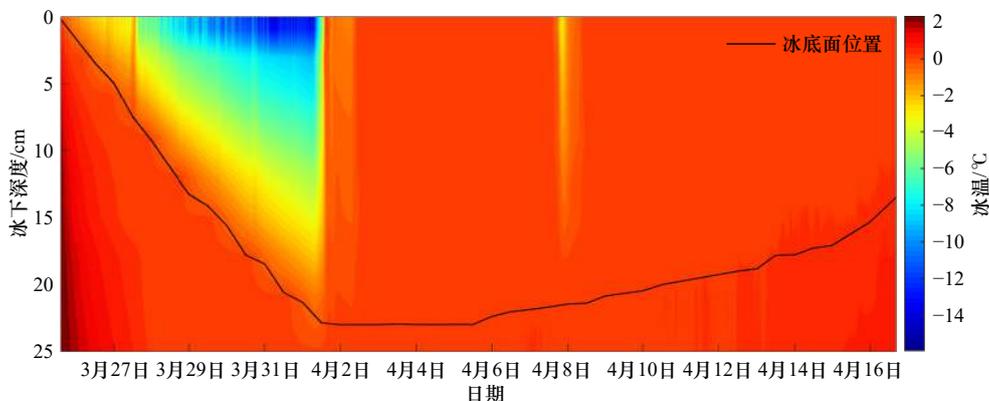


图 6 试验期间的冰温变化

Fig. 6 Ice temperature variation during the experiment

图中黑色实线为冰底面位置

The solid black line is the ice base

分原因是因为水体在 0~4℃ 区间密度是随温度增大的,表层加热的水体会逐渐沉降到水槽底部;但是这个过程较为微弱,贯通水体的竖向相对高温带只在图 7 中零星出现。另一个可能的原因是在长期升温过程中,由于水槽底部保温层间隙,导致水体底部被额外加热,造成下层的水温随着水深增加。这一过程也进一步解释了冰的底面融化早于侧面融化、且底

面融化厚度大于侧面融化厚度的现象。布置于冰样内部的冰温链 L1 同样观测到了底层水温的这种变化,而且规律完全一致。但是必须说明的是,底层水温升高的影响范围在试验过程中始终维持在水深 25 cm 以下,密度关系层较稳定,且直接导致冰样侧面融化的是水深 20 cm 范围之内水体,因此底层水温变化对侧向融化的直接影响可以忽略。

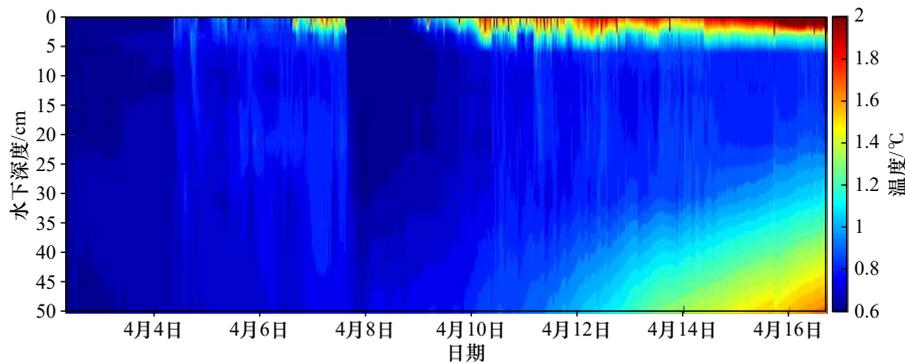


图 7 试验期间不同深度处的水温

Fig. 7 Water temperature at different depths during the experiment

## 4 讨论

### 4.1 气温对侧面融化速率的影响

融冰期间中,气温是影响冰-水界面侧向融化的关键因素<sup>[6]</sup>;因为气温影响着水温的变化,而水温直接控制着冰-水界面的融化。把融冰期各时间段的平均侧向融化速率与气温拟合,结果如图 8 所示。

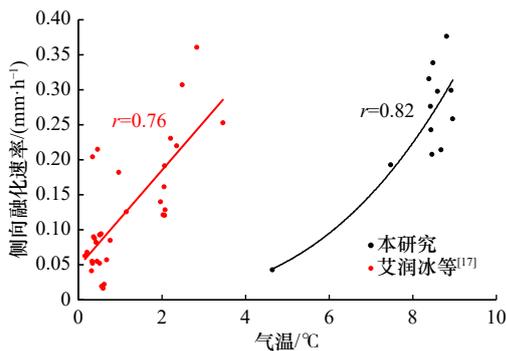


图 8 气温与平均侧向融化速率的拟合关系

Fig. 8 Fitting relationship between temperature and mean lateral melting rate

融冰期间实验室温度在 4~10℃ 逐步升高,冰层侧向融化速率也随之递增。通过拟合可得到平均侧向融化速率  $M_l$  与实验室气温  $T_a$  的关系式为

$$M_l = 1.184 \times 10^{-3} T_a^{2.54}, \quad 4^\circ\text{C} \geq T_a \geq 10^\circ\text{C}, \quad r = 0.82, \quad (1)$$
式中,  $M_l$  和  $T_a$  的单位分别为 mm/h、℃。图 8 中 4~8℃ 区间的数据点分布偏少且不均匀,是因为此温度段设

置在融冰前中期。此时侧向融化速率很小,为减少仪器精度带来的误差影响,融冰前中期取点的时间间隔较大(48 h),导致融冰前期的数据点较后期偏少。

在艾润冰等<sup>[17]</sup>的淡水冰侧向融化研究中也通过拟合得到了气温与水下深度 8 cm 处侧向融化速率的参数化方案为  $M_l = 0.063 \ 63 T_a^{1.243}$  ( $r = 0.76$ ),如图 8 中红色点所示。本文的拟合结果要优于文献 [17],之所以会存在差异,是因为本试验的气温控制范围(4~10℃)要高于其试验的气温控制范围(0~4℃),使得本试验中的侧向融化速率对于气温的响应更加显著,相应的拟合关系更好。而在气温为 4℃ 附近时,本文测得的侧向融化速率要低于文献 [17],是因为本文的实验室气温控制在 4℃ 附近时冰样处于融化前期,平均水温偏低约 0.6℃;而文献 [17] 的气温控制在 4℃ 附近时冰样处于融化后期,水下深度 8 cm 处水温偏高约 0.7℃。水温是引发冰样侧向融化的直接因素,导致在相同气温时本文的侧向融化速率偏低。

### 4.2 水温及水-冰温差对侧向融化速率的影响

图 9 给出了基于不同深度处的水温和冰温得到冰侧面平均水温、平均水-冰温差与平均侧向融化速率的关系。拟合发现,侧向融化速率随着水温及水-冰温差的升高以幂函数形式快速升高,平均水-冰温差在 0.5~0.6℃ 之间,与平均侧向融化速率的相关系数为 0.48;平均水温的温度范围在 0.7~0.9℃ 之间,与平均侧向融化速率的相关系数为 0.74。

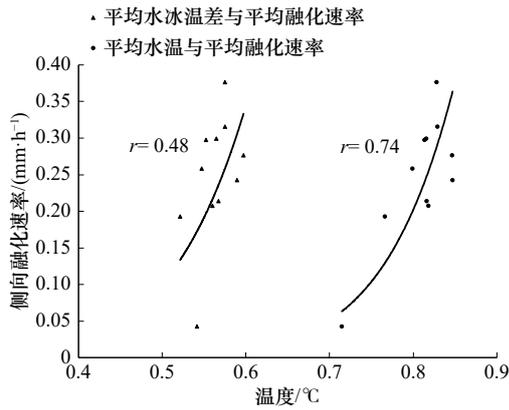


图 9 平均水温及水冰温差与平均侧向融化速率拟合图  
Fig. 9 Fitting diagram of average water temperature and water-ice-temperature difference with average lateral melting rate

平均侧向融化速率  $M_l$  与平均水温  $T_w$  的关系式为  $M_l = 0.83T_w^{5.78}$ ,  $0.7^\circ\text{C} \leq T_w \leq 0.9^\circ\text{C}$ ,  $r = 0.74$ , (2)  
平均侧向融化速率  $M_l$  与水冰温差  $T_{w-i}$  的关系式为  $M_l = 2.76T_{w-i}^{4.21}$ ,  $0.5^\circ\text{C} \leq T_{w-i} \leq 0.6^\circ\text{C}$ ,  $r = 0.48$ , (3)  
式中,  $T_w$ 、 $T_{w-i}$  单位均为  $^\circ\text{C}$ 。

平均侧向融化速率与水温的拟合关系比与气温的拟合结果稍差, 但与冰-水侧向融化界面的实际位置, 融化发生时在侧向冰-水界面处会形成边界层, 水流发生紊乱, 导致所测得的水温会与侧向冰-水界面上的实际水温产生偏离<sup>[20]</sup>, 从而水温与

平均侧向融化速率的拟合比实际情况在一定程度上要差一些。同样处于远场位置的冰温也会与侧向冰-水界面上的实际冰温产生水平方向差异。除此之外, 冰温与水温的变化范围仅在  $0.1 \sim 0.2^\circ\text{C}$  以内, 较气温变化范围 (约  $6^\circ\text{C}$ ) 更窄, 对融化速率的影响更加强烈的同时, 也导致有限的测量误差对变化趋势的影响更加明显。

### 4.3 深度对侧向融化速率的影响

为了体现融化过程在冰侧面的不均匀性, 图 10 给出了在融化后期不同深度处的侧向融化速率与气温的关系。在相同的气温下, 不同深度处的侧向融化速率随着气温的变化不尽相同, 而且随着深度的增加侧向融化速率有着同步增长的趋势。

因此, 可以认为冰-水界面侧向融化分别同时受温度和深度的共同影响。通过二元回归分析可分别拟合得到侧向融化速率关于气温和深度、水温和深度的关系式为

$$M_l(Z, T_a) = 1.65 \times 10^{-6} e^{3.08Z} \times T_a^{4.68}, \quad 0.4 \leq Z \leq 0.8; 4^\circ\text{C} \leq T_a \leq 10^\circ\text{C}, \quad r = 0.68, \quad (4)$$

$$M_l(Z, T_w) = 0.39 e^{1.97Z} \times T_w^{8.74}, \quad 0.4 \leq Z \leq 0.8; 0.7^\circ\text{C} \leq T_w \leq 0.9^\circ\text{C}, \quad r = 0.69, \quad (5)$$

式中,  $Z$  代表归一化的深度, 在  $0 \sim 1$  内变化, 1 对应超声测量最大深度范围 20 cm 处。侧向融化速率关于气温/水温和深度的变化关系如图 11 所示。

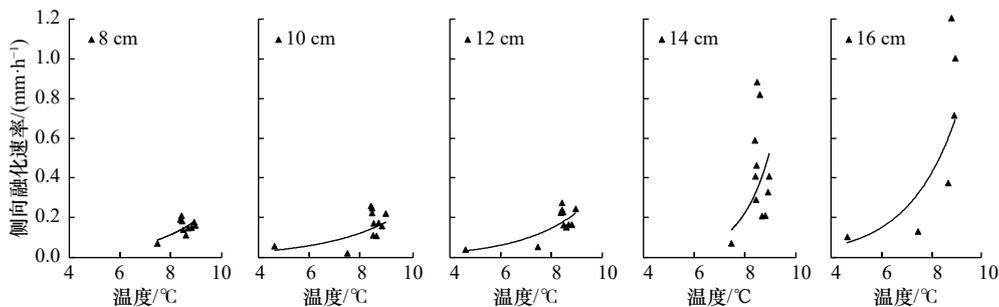


图 10 气温与水下不同深度处侧向融化速率的变化关系  
Fig. 10 Relationship between temperature and lateral melting rate at different depths of water

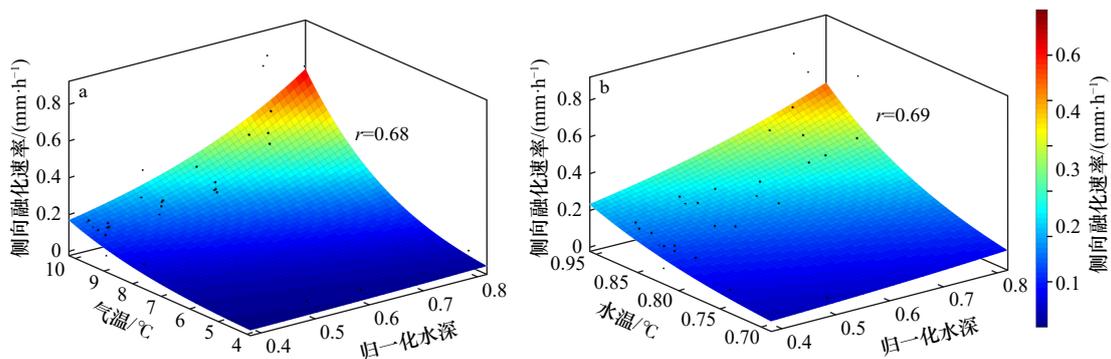


图 11 侧向融化速率与气温和深度(a)、水温和深度(b)的变化关系  
Fig. 11 The relationship between lateral melting rate with temperature and water depth (a), water temperature and depth (b)

在图 11a 中,侧向融化速率随着气温和深度的增加逐渐增大,式(4)的适用范围分别为  $0.4 \leq Z \leq 0.8$ ,  $4^\circ\text{C} \leq T_a \leq 10^\circ\text{C}$ 。在图 11b 中,侧向融化速率随着水温 and 深度的变化情况也类似,式(5)的适用范围分别为  $0.4 \leq Z \leq 0.8$ ,  $0.7^\circ\text{C} \leq T_w \leq 0.9^\circ\text{C}$ 。与式(1)至式(3)相比,式(4)和式(5)能够准确地描述侧向融化速率在深度上的不均匀性。然而,根据试验结果,造成这种不均匀性的直接原因,与不同深度处冰-水温度差的关系较弱,因为式(5)中水温变化仅在  $0.2^\circ\text{C}$  以内。更重要的原因是因为越靠近冰底,侧向融化的发生越容易受到冰侧水体热通量和冰底水体热通量的共同作用,在相同的冰-水温差条件下产生比中层更大的融化速率。类似的现象在前人成果中也有报告:李志军等<sup>[13]</sup>的实验中,规则圆盘形冰试样最终融化成光滑球底状;在雷瑞波等<sup>[14]</sup>的北极夏季海冰的观测现场中,浮冰侧面表层和底层的融化较中层更加显著,可能是侧向海洋热通量、底面垂直向上的海洋热通量以及传输到冰底的太阳短波辐射复合作用的结果。本试验中尽管使用的是淡水,但整体水温较低,最高不超过  $2^\circ\text{C}$ ,因此保持了与极地现场一致的水温背景条件。与前人的平均融化速率相比,本文的研究结果与现场的情况更加吻合,可以更加准确地描述冰侧面融化的真实情况。

## 5 结论与展望

本文通过开展低温实验室水槽试验来模拟冰的侧向融化过程,通过测量试验期间的冰底生消过程、冰-水侧向界面消融过程、实验室气温、冰温及水温,

定量探究实验室环境下冰-水侧向界面的变化过程及其影响因素。得出了以下结论。

(1)融冰期的冰-水界面侧向融化中,上部(0~5 cm)融化受气温影响明显,下部(5~20 cm)融化受水温的直接影响。

(2)融冰前期侧向融化缓慢且速率较为均匀;融冰中后期侧向融化逐渐加速,越靠近冰底越容易受到冰侧水体热通量和冰底水体热通量的共同作用,导致侧向融化速率随着水下深度的增加而显著增加。

(3)同一条件下,冰-水界面侧向融化速率小于底面融化速率和表面融化速率,全过程中表面融化、底面融化和侧向融化在总融化量中的占比分别为 57.7%、36.1% 和 6.2%。

(4)平均冰-水侧向融化速率与气温的相关性最高,其次是平均水温,再次是水冰温差;而侧向融化速率的非均匀性可以由温度(气温、水温)和深度的二元关系来定量表征。

影响北极海冰侧向融化的因素众多,本研究是在无盐、无风、无辐射的变温条件下进行的,探究了影响侧向融化速率的关键因素与物理过程,验证了进行非均匀性侧向融化试验技术的可行性。下一步通过补充风速、光源等条件进行海冰试验,可以期待得到更加接近北极真实情况的变化规律,为侧向融化的参数化提供支撑。其次,本试验中冰试样的侧向融化量较表面和底面融化量偏低,与北极夏季海冰侧向融化真实贡献相比也略低,后期实验中可以通过人为调整增加侧向融化占比,让其侧向融化特性更显著地体现。

### 参考文献:

- [1] Deser C, Walsh J E, Timlin M S. Arctic sea ice variability in the context of recent atmospheric circulation trends[J]. *Journal of Climate*, 2000, 13(3): 617-633.
- [2] Screen J A, Simmonds I. The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification[J]. *Nature*, 2010, 464(7293): 1334-1337.
- [3] Holland M M, Bitz C M, Tremblay B. Future abrupt reductions in the summer Arctic sea ice[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(23): L23503.
- [4] Overland J E, Wood K R, Wang Muyin. Warm Arctic-cold continents: climate impacts of the newly open Arctic Sea[J]. *Polar Research*, 2011, 30(1): 15787.
- [5] Perovich D K, Polashenski C. Albedo evolution of seasonal Arctic sea ice[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(8): L08501.
- [6] Malinka A, Zege E, Istomina L, et al. Reflective properties of melt ponds on sea ice[J]. *The Cryosphere*, 2018, 12(6): 1921-1937.
- [7] Schröder D, Feltham D L, Flocco D, et al. September Arctic sea-ice minimum predicted by spring melt-pond fraction[J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4(5): 353-357.
- [8] Wang Q, Danilov S, Jung T, et al. Sea ice leads in the Arctic Ocean: model assessment, interannual variability and trends[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(13): 7019-7027.
- [9] Zubov N N. Arctic Ice[M]. San Diego: Navy Electronics Laboratory, 1963.
- [10] Josberger E G. Laminar and turbulent boundary layers adjacent to melting vertical ice walls in salt water[D]. Seattle: University of Washington, 1979.

- [11] Perovich D K. On the summer decay of a sea ice cover[D]. Seattle: University of Washington, 1983.
- [12] Steele M. Sea ice melting and floe geometry in a simple ice-ocean model[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97(C11): 17729–17738.
- [13] 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.  
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.
- [14] 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 Ruiبو, 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Bilello M A. Maximum thickness and subsequent decay of lake, river, and fast sea ice in Canada and Alaska[R]. Hanover: U. S. Army, Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1980.
- [20] Josberger E G, Martin S. A laboratory and theoretical study of the boundary layer adjacent to a vertical melting ice wall in salt water[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1981, 111: 439–473.

## Laboratory experimental study on the lateral melting process of ice layer

Jia Lei<sup>1</sup>, Jiang Lingqiang<sup>1</sup>, Lu Peng<sup>1</sup>, Xie Fei<sup>1</sup>, Zu Yongheng<sup>1</sup>, Wang Qingkai<sup>1</sup>, Li Zhijun<sup>1</sup>

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

**Abstract:** In order to investigate the melting process at the ice-water lateral interface and to quantify the dominant factors affecting the lateral melting rate of ice layer, an ice melting experiment was carried out in a low-temperature water tank. Simultaneous measurements of the ice bottom and surface processes and the lateral melting process of the ice layer were carried out, while the laboratory air temperature, ice temperature at different depths inside the ice samples and water temperature at different depths in open water were recorded, the relationships between different elements and their influence patterns on the lateral melting rate of ice were investigated using correlation analysis methods. The results show that the lateral melting rate at different depths inside the ice samples was slow and uniform in the early stage of melting, with an average melting rate of 0.05 mm/h. The lateral melting rate at different depths in the middle and late stages of melting increased significantly and was no longer uniform, with an average melting rate of 0.15 mm/h. The correlation coefficient of the average lateral melting rate and air temperature ( $r=0.82$ ) was better than that between the average water temperature ( $r=0.74$ ) and the water-ice temperature difference ( $r=0.48$ ). The quantitative relationships of lateral melting rate with temperature (air temperature, water temperature) and depth were established to accurately describe the non-uniformity of the lateral melting process of ice layer. It also verifies the feasibility of conducting non-uniform lateral melting test techniques, and lays the foundation for sea ice tests that more closely resemble real Arctic conditions considering wind speed and light source conditions.

**Key words:** lateral melting rate; temperature; water depth; parameterization; low temperature experiment