

DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2021.06.007

不同流速下冰融化率的实验室探究

毕瀚文^{1,3}, 李一国¹, 罗浩恒¹, 曹勇^{1,2*}, 陈旭^{1,2}, 孟静^{1,2}

1. 中国海洋大学 海洋与大气学院, 青岛 266100, E-mail: caoyong@ouc.edu.cn;
2. 海洋学国家级实验教学示范中心, 青岛 266100;
3. 中国海洋大学 深海圈层与地球系统前沿科学中心/物理海洋教育部重点实验室/
中国海洋大学 未来海洋学院, 青岛 266100)

摘要: 冰山融化的淡水通量对于大洋环流和全球气候具有重要的作用, 但目前冰山融化的动力学机制尚未研究成熟。该文在实验室条件下, 通过对冰的融化过程进行测量和分析, 研究不同流速对冰侧向和底面融化的影响。利用实验室循环流实验水槽产生不同流速的均匀流, 测量冰的侧面和底面的面积变化及冰的质量以反映冰的融化情况, 并利用 PIV 技术测定高流速和低流速下的流场分布。结果表明, 背景流的流速对冰的融化存在明显差异, 其原因为融水羽流在不同流速下流动性质的差异: 低流速下以羽流形式附着, 高流速下以涡旋结构分离脱落, 混合加速热量交换, 引起冰的快速融化。此外, 该文发现高流速下底面比侧面融化更快, 且底面对流速的反应更灵敏。这是主要由于冰流相互作用导致不同混合机制: 冰底流场剪切不稳定性引发强烈的湍混合, 而冰后侧流场主要由地形涡导致混合。该文对分析冰在不同流速下的融化有初步认识, 并为冰-海模式参数化方案提供一定参考价值。

关键词: 冰; 流; 侧融率; 底融率

中图分类号: P731

文献标志码: A

Laboratory study of iceberg melting under distinct flow velocity

BI Han-wen^{1,3}, LI Yi-guo¹, LUO Hao-heng¹, CAO Yong^{1,2*}, CHEN Xu^{1,2},
Meng Jing^{1,2}

1. College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;
2. National Oceanography Experimental Teaching Demonstration Center, Qingdao 266100, China;
3. Key Laboratory of Physical Oceanography and Frontiers Science Center for Deep Ocean Multispheres and Earth System/Academy of the Future Ocean, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Fresh water flux of iceberg melting plays critical role in ocean circulation and global climate, but the dynamic mechanism of iceberg melting is not well researched. In this paper the effects of distinct flow velocity on ice side and bottom melting are explored by experiment in the laboratory. The laboratory circulating water tank is used to generate uniform flow at different velocity, and ice melting is reflected by the area change of ice and ice mass, and flow field at high and low velocity is measured

收稿日期: 2021-10-30(2021-11-20 修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金面上基金(41776192, 4207622)

作者简介: 毕瀚文(2000—), 女, 山东烟台人, 本科生。

Received: October 30, 2021 (**Revised** November 20, 2021)

Project supported by foundations: Supported by the National Natural Science Foundation of China (41776192, 4207622)

Biography: BI Han-wen (2000—), Female, Undergraduate.

by PIV technology. The result indicates the influence of the distinct velocity of background flow on the ice melting is discrepant. The reason is that the melt plume adheres in the form of plume at low flow velocity, and separates in the form of vortex structure at high flow velocity to accelerate mixing. Besides, the experiment indicates the melting speed of the ice bottom is faster than that of the ice side at high velocity, and the response of the bottom surface to the velocity is more sensitive. This paper argues that with the interaction of ice and current, the differences of current structure leading to different hybrid mechanism is the main reason. Shear instability at ice bottom causes violent turbulent mixing, and mixing caused topography eddy is the main reason for ice flank melting. This experiment has a preliminary understanding for analysis of ice melting at different flow velocities, and provides a certain reference for the parameterization scheme of ice-sea model.

Key words: Ice; Flow; Side melting rate; Bottom melting rate

引言

近十年南北极的质量损失均较过去有所增加^[1], 其中约一半来自南极和格陵兰岛冰架边缘冰山的裂解。断裂的冰山会随着洋流漂浮, 并逐渐融化释放淡水, 从而影响大洋环流、生物活动以及海冰形成。冰山融化主要分为两部分^[2-3]: 海平面之上和海平面之下冰的融化。在海气界面之上, 太阳辐射及风引起的强迫对流和升华均会使冰山融化, 但这部分过程对于冰山整体的融化可以忽略, 而界面处影响最大的是波浪侵蚀过程, 既能够传递热量又能够使冰山破裂; 在海气界面之下, 浮力和强迫对流对于冰山水下部分起着重要的作用。强迫对流引起的融化是外部流体(流速、温度及盐度)和冰自身性质(温度)的函数^[2-3]。为了更好地理解物理过程并且将水下融化部分考虑到通用环流模式中(GCMs), 两种广泛使用的参数化方案由 Weeks 等^[4](WC)和 Holland 等^[5](HJ)提出, WC 的参数化适用于冰山, 由 Bigg 等^[6]引入 GCMs 中。但有一系列的证据表明, 冰山融化在 GCMs 的参数化过于简化, 比如 Stern 等^[7]证明该方案对于扁平冰不适用。国外实验室为改善 WC 的参数化方案, 在实验室条件下研究冰山融化的动力学机制: FitzMaurice 等^[8]引入了由于浮力融水产生的侧融化, FitzMaurice 等^[9]研究了背景流的剪切作用也会导致冰山的侧融率出现非线性增加的现象。本文在国外实验的基础上, 进一步探究不同流速下冰融化规律, 并定量分析原因, 与前人的研究成果进行比较, 为冰山参数化过程提供一定的参考。

1 实验内容

1.1 实验原理

冰山融化分为来自太阳辐射的表面融化、浮力垂向对流和强迫对流引起冰的水下部分融化、边缘处的

波浪侵蚀以及小部分的冰山裂解四部分^[6,10-11]。表面融化相对其他几项比较小, 因此对于冰山融化的参数化分为: 底融化、侧向融化和波浪侵蚀三部分^[10]。根据 Fitzmaurice 等^[8]采用的冰山的水下部分冰的融化率 SMR 公式

$$SMR = \frac{dW}{\rho_i A_{ave} dT} \quad (1)$$

式中: dW 为一定时间内冰质量的变化, ρ_i 为冰的密度, A_{ave} 为冰块的平均浸没总表面积, dT 为冰块融化的时间。利用该公式分别计算侧融率与底融率, 利于研究实验过程中冰底与冰侧的融化速率。

同时, 为研究不同流速下冰的融化与流场的相互作用, 本文利用 PIV 技术计算冰周围的各个区域的湍动能耗散率和剪切。根据湍动能耗散率的定义

$$\varepsilon = 2\nu S_{ij} S_{ij} = \nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2)$$

根据流体连续性方程, 考虑流体的不可压缩性和各向同性, 将式(2)推导为二维湍耗散率公式^[12]

$$\varepsilon_D = 2\nu \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] \quad (3)$$

式中: $\nu = 1.335 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 为运动黏滞系数。

1.2 实验设置

本文实验在由中国海洋大学自主设计研发的循环流实验水槽中进行, 如图1和图2所示。循环流实验水槽相较于电泵式水槽, 具有流速稳定且易调节流速的优点, 可产生均匀背景流, 其中水槽部分长 136.5 cm、宽 20 cm 和高 30 cm。实验中冻结长 18 cm、宽 12 cm 和高 10 cm 的淡水冰进行实验。将冰置于流

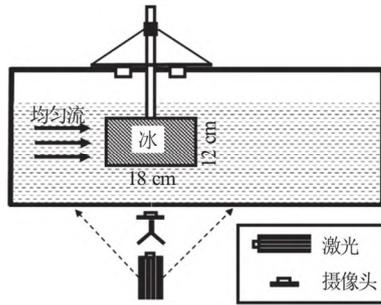


图1 实验装置图(侧视图)

Fig.1 Diagram of experimental device (side view)

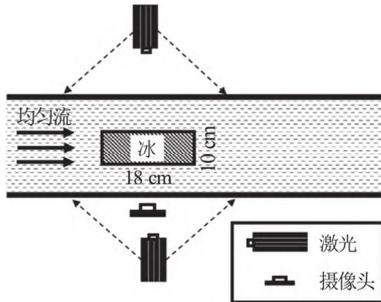


图2 实验装置图(俯视图)

Fig.2 Diagram of experimental device (top view)

速分别为0.02 m/s、0.025 m/s、0.03 m/s、0.035 m/s、0.04 m/s、0.045 m/s、0.05 m/s和0.055 m/s的背景流中进行8组实验。在实验过程中每3 min用电子秤测量一次冰的质量，并拍摄冰的侧面与底面计算面积变化，利用温度探头每10 s记录一次冰温和水温。

PIV测速系统采用波长532 nm、功率为4 W的激光器产生片光源，垂直冰底向上照射。利用粒径为50 μm 的粒子进行示踪，相机拍摄帧率40 Hz，主区域为(40×40) pix，子区域为(20×20) pix。利用PIV测速系统测定冰底与冰后区域的流场分布情况，研究不同流速下冰的融化与流场的相互作用。

2 实验数据处理与分析

2.1 不同流速下侧融率与底融率

雷诺数反映在不同流速下背景流的流动性质差异， $Re = \frac{UL}{\nu}$ ，其中 U 为背景流流速， L 为冰的宽度， ν 为运动学黏性系数。在实验的流速区间内，雷诺数从3 000变化至10 000，即该过程存在层流向湍流的转变。因此，本文定义0.02 m/s-0.03 m/s为低流速区间，该区间内背景流以层流为主；0.04 m/s-0.055 m/s为高流速区间，该区间内背景流以湍流为主。

根据式(1)计算不同流速下的底融率与侧融率，并对冰的融化过程进行分析。在融化开始阶段，冰

的底融率在各个流速背景流的情况下较为接近，但是随着冰的融化，大约9 min时，低流速(0.02 m/s-0.03 m/s)和高流速(0.04 m/s-0.055 m/s)的底融率开始出现不同的变化特征(图3)，且高低流速区间内的底融率变化规律相一致。低流速下，冰的底融率增速较缓，而高流速下冰的底融率快速增加，冰底部的融化加速。融化过程中侧融率随时间的变化情况与底融率不同(图4)，不同流速下，侧融率均随时间增大，对于高低流速的灵敏度不高，但也存在一定的差异性：低流速下(0.02 m/s-0.03 m/s)的侧融率比高流速下(0.04 m/s-0.055 m/s)的侧融率随时间变化更加缓慢。随着背景流流速增加，冰的侧面融化加快。对比不同流速下底面与侧面的融化速率，本实验发现底面融化率对于流速变化的反应更加灵敏，高流速区间内底融化率变化趋势一致。

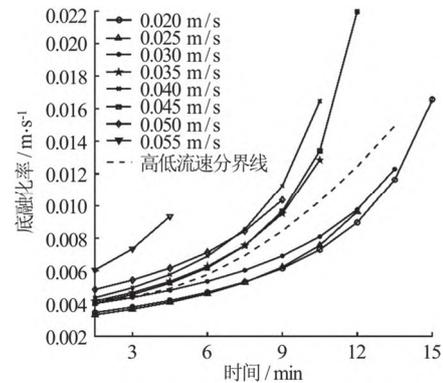


图3 不同流速下底融率的时间序列曲线

Fig.3 Time series of bottom melting rate at diverse velocity

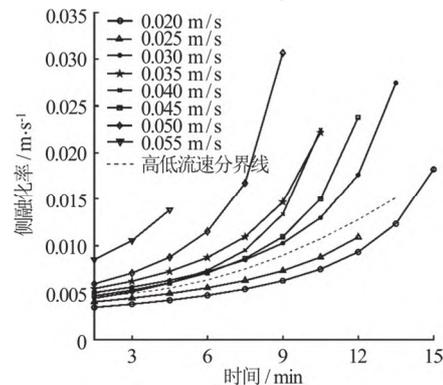


图4 不同流速下侧融率的时间序列曲线

Fig.4 Time series of flank melting rate at diverse velocity

图5为不同流速下底融率和侧融率的比值，在低流速下，比例接近，而在高流速下(0.03 m/s-0.055 m/s)，底融率占主导，即高流速下底面比侧面融化更快。在各个流速下，随着时间增加，侧融率所占比例均增大，表明即使冰的原有底面积与侧面积大小相近，侧融率在融化后期也会占主导，侧融化在冰的融化过程中依旧起到不可忽略的作用。

目前若考虑热力效应对冰的侧融化的影响，常采用侧融热化率 M_s 公式

$$M_s = K |\bar{u} - u_0|^{0.8} \frac{|T_0 - T|}{L^{0.2}} \quad (4)$$

式中: T_0 为水温度, T 为冰的温度, L 为流向上冰的长度, K 为比例常数, $K = C \frac{kPr^m}{\rho_i \Gamma v^m}$, $C=0.37$, $m=0.8$, $n=1/3$ ^[4], ρ_i 为冰的密度, $\Gamma=3.34 \times 10^5$ J/kg 为冰的潜热系数^[3], k 为水的热导系数, ν 为黏度系数, Pr 为普朗克系数。在海水中 T 约为 0°C , $k=0.563$, $Pr=13.1$, 得到 $K=0.58$; 实验室条件下的 K 根据实验室的温度确定。侧热融率 M_s 曲线(图6)主要研究热力因素在冰融化过程的影响, 不同流速下 M_s 为线性增加, 无法体现图3和图4所示的高低流速的差异, 因此热力学过程对本次实验的影响较小, 动力过程对冰融化的影响需要进一步研究。

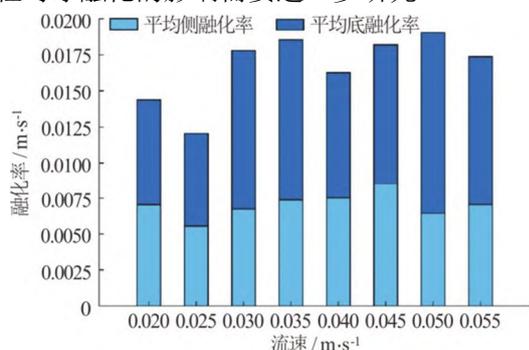


图5 (网上彩图) 不同流速下底融率和侧融率的比值
Fig.5 (Color online) The ratio of bottom melting rate and flank melting rate at diverse velocity

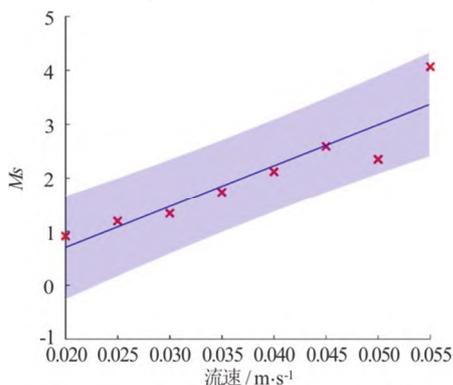


图6 (网上彩图) 不同流速下的 M_s
Fig.6 (Color online) Ice flank melting rate at diverse velocity

2.2 不同流速下的剪切与湍能耗散率

为研究不同流速下冰融化的动力机制, 本文利用PIV技术测定低流速(0.02 m/s)和高流速(0.05 m/s)下冰融化过程中的流场分布情况, 并根据公式(3)计算测量区域内的湍动能耗散率、剪切和旋度。对于整体流场, 湍能耗散率较大值集中在冰底区域和冰后区域, 因此将实验区域分为冰底边界层区域和冰后边界层区域进行研究。由图7(a), 高流速下冰底

的湍动能耗散率明显高于低流速, 而冰后高流速下的湍动能耗散率略大。图7(b)显示不同流速不同区域下的剪切强弱, 冰底与冰后区域内, 高流速下的剪切均强于低流速下的剪切。因此本文推测由剪切不稳定性导致的湍混合作用是影响高流速下冰底面比冰侧面融化更快的重要原因。此外, 湍动能耗散率引起不同流速下冰的融化差异性的原因需要根据流场的空间分布进一步分析与讨论。

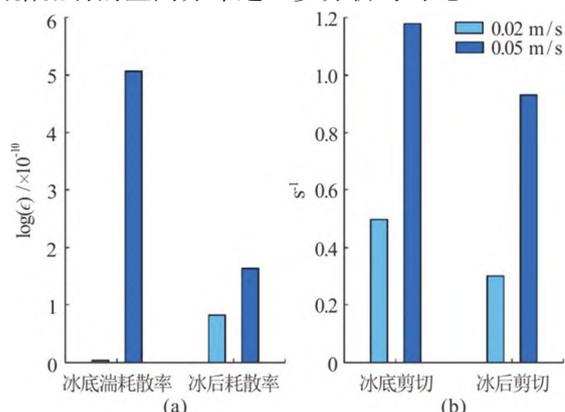


图7 (网上彩图) 0.02 m/s 和 0.05 m/s 流速下不同区域(冰底、冰后)湍耗散率(a)与剪切(b)的平均值
Fig.7 (Color online) Average turbulent dissipation rate (a) and shear (b) of 0.02 m/s and 0.05 m/s velocity under different areas (ice bottom, ice back)

对于冰底边界层区, 低流速下, 冰底由一层剪切较弱且湍耗散率较小的流体附着(图8a和图8c), 判断该层流体为冰融化生成的温度较低的融水, 融水的附着使冰底混合作用较弱, 热量耗散较慢, 因此冰与周围温度较高的背景流进行的热量交换较为缓慢, 故低背景流流速下, 冰底的融化较慢。而对于高背景流流速, 由图8b可知, 冰底边界层剪切剧烈, 湍动能耗散率为冰底空间内最大值(图8d)。因此, 高流速下融水具有极强的剪切不稳定性, 无法附着在冰的表面, 以涡旋的形式脱落(图8f), 剧烈地湍混合, 周围温度较高的背景流与冰进行快速的热量交换, 从而导致高流速下的冰底融化较快。

对于冰后边界层区, 低流速下, 冰后边界层内剪切较弱(图8a), 且没有明显的涡旋脱落(图8e), 但湍耗散率在整个冰后区域较为均匀(图8c), 因此对于冰后边界层区, 低流速下剪切不稳定性不是引起湍耗散的主要原因, 推测由于温差导致的对流不稳定性是重要影响因素; 高流速下, 冰后存在冰上侧与下侧较为对称的极强的绕流剪切(图8b), 而湍耗散率出现低值区(图8d), 这导致了冰后区平均湍动能耗散率偏低。通过旋度场(图8f)发现冰后存在明显较大的涡旋结构, 涡旋处湍耗散率强, 因此可判断在高流速下, 地形涡引起的湍耗散为引起冰后混合的原因, 但由于混合位置距离冰较远, 因此冰后侧存在不受涡旋影响的低值区, 冰后融化速率较冰底更加缓慢, 对于流速变化相应较慢。

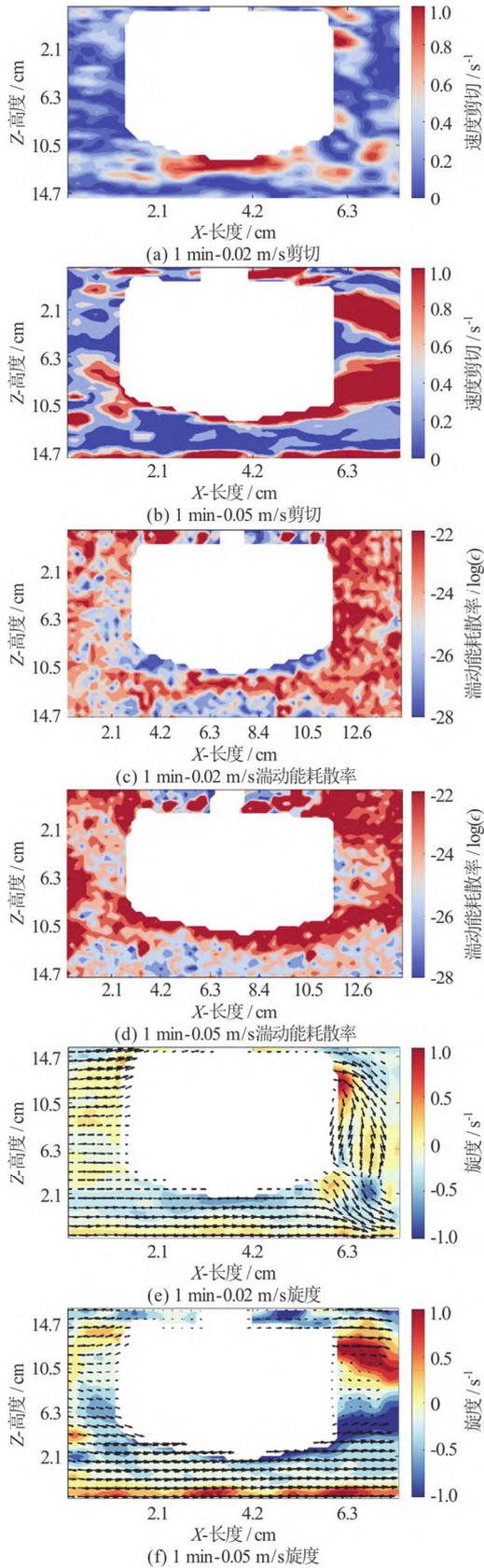


图 8 (网上彩图) 0.02 m/s 和 0.05 m/s 流速下的剪切(a、b)、湍动能耗散率(c、d)、旋度场(e、f)，箭头为流场
 Fig.8 (Color online) Shear(a, b), turbulence dissipation rates(c, d), curl distribution(e, f)at 0.02 m/s and 0.05 m/s flow rates and arrow indicates velocity field

3 分析与讨论

本文通过 8 组融化率实验和 2 组 PIV 测量流场实验研究不同流速下冰底面融化和侧面融化的特征，结果表明冰底面与侧面的融化均会受到背景流流速的影响，高流速背景流以湍流为主，加速冰底面和侧面的融化。冰底面对于高流速和低流速的反应更灵敏，融化较快。冰底面与侧面融化的差异性是由于不同的混合机制造成的，高流速下冰底融水受到强烈的剪切不稳定性，造成强烈的湍混合，加速热量交换；高流速下冰侧面受到地形涡引起的耗散混合作用，但由于影响区域距冰较远，冰的侧面比冰底融化更缓慢，对流机制的作用有待进一步研究。

冰融化的动力机制对不同流速下冰的融化是不可忽视的原因。利用冰染色实验追踪融水的流动，进一步验证上文观点。在不同流速下，冰融化速率与冰前后水体混合的结构和融水的流动性有关。低流速下，背景流以层流为主，冰在融化时产生融水羽流。冰的底面如图9a所示，融化后产生的融水没有明显的涡旋结构，混合深度较浅，底面周围以温度较低的融水为主，因此底面融化速率较慢。如图9b冰的底面俯视图所示，冰在顺流两侧涡旋较少，混合较弱，融水以羽流的形式附着在冰的两侧，温度较低的融水使得冰侧面融化速率减慢。高流速下，背景流以湍流为主，融水与冰的表面分离，混合增强。图9c显示背景流与冰作用后产生的融水以涡旋的形式脱落，使温度较低的融水脱离冰，因此冰与温度较高的背景流直接接触，融化加速，侧面也观察到涡旋的脱落(图9d)。此外，在下游冰后区域有大量地形涡产生(图9c)。涡旋加速混合，将融水快速与冰分离，导致高流速下侧融率的差异性。涡旋加速混合，融化迅速，因此冰底前侧和冰顺流后侧会在融化结束后出现凹陷的结构。以上染色实验观测到融水羽流的分布情况，进一步验证了前文对于不同流速不同区域下冰融化动力机制的猜想与分析。

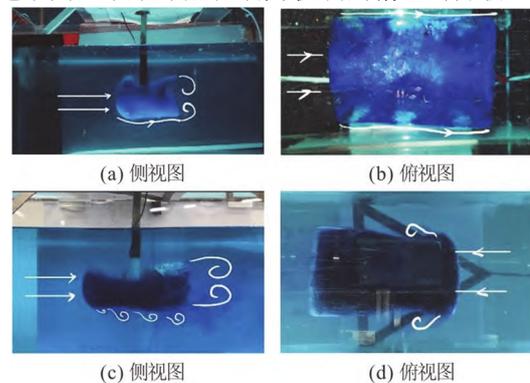


图 9 (网上彩图) 0.02 m/s(0.05 m/s)流速下冰融化融水分布情况的侧视图 a(c)、俯视图 b(d)
 Fig.9 (Color online) Side view a (c), top view b (d) of ice melt water distribution at 0.02m/s (0.05m/s)

本文与FitzMaurice等^[8]在2017年测量的SMR量级相等, FitzMaurice等^[8]对不同流速下融水的附着与脱落情况进行讨论, 认为一旦融水脱落, 温暖的背景流将与冰接触, 因此高流速下融化率增加。然而, 本文认为高低流速下冰融化产生融水的流动性差异为重要原因, 并对流场定量测量, 发现不同流速下, 冰流相互作用下流场的结构差异造成了不同混合机制。融水低流速时以羽流形式附着在底面, 而在高流速时融水会以涡旋结构脱落, 加速冰的融化, 且与背景流快速混合。高流速下, 底面强烈的剪切不稳定性造成的湍耗散加速底面的融化, 而在背景流后侧混合的机制不同, 主要由地形涡导致, 但热力对流在冰后区混合的作用仍有待验证。此外, 实验中发现融水低温, 背景流温度高, 温差增大, 也将加速冰的融化。有关热力学对冰融化的影响还需要进一步的实验论证。

4 结论

本文利用PIV技术, 研究表底面积与侧面积大小近似的冰在不同流速的背景流下, 融化率的差异性并结合流场分布从动力机制方面分析差异性的原因。

(1) 不同流速冰的融化速率与融水羽流的动力学性质及分布密切相关。

在不同流速下, 冰的融化率以及冰的融化对周围流场产生的作用存在明显的差异。低流速时, 融水羽流以层流的形式附着表面, 流场剪切较弱, 生成涡旋较少, 湍动能较低, 与周围水的混合较弱, 冰的融化较慢; 高流速时, 融水羽流以涡旋的形式快速脱落, 流场剪切较强, 生成大量涡旋, 湍动能耗散率较大, 与周围水快速混合, 加速冰的融化。

(2) 冰底面与冰后侧融化率的差异源于冰流相互作用造成的不同混合机制。

在不同流速下, 冰的底面和侧面的融化过程也存在差异性。高流速下, 底面比侧面融化更快, 反应更灵敏。这种差异的主要原因是冰流相互作用下流场结构的差异造成不同混合机制。高流速下, 冰底面流场剪切不稳定性引起的湍混合加速热量交换, 进而加快冰的融化; 冰侧面流场的耗散混合主要受地形涡作用, 但影响区域较远, 在冰后侧出现耗散低值区, 因此造成底融率与侧融率对于高低流速响应的差异性。

致 谢

感谢中国海洋大学海洋学国家级实验教学实验示范中心和物理海洋与海洋学实验室的支持、研究生何啸和谭娇的帮助指导, 在此致以诚挚的感谢。

参 考 文 献:

- [1] BAMBER J L, ASPINALL W P. An expert judgement assessment of future sea level rise from the ice sheets[J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3(4): 424-427
- [2] ENDERLIN E, HAMILTON G S. Estimates of iceberg submarine melting from high-resolution digital elevation models: Application to sermilik fjord, east greenland[J]. *Glacial*, 2014, 60: 1084-1092.
- [3] SAVAGE S B. Aspects of iceberg deterioration and drift[M]. BALMFORTH N J, PROVENZALE A. *Geomorphological Fluid Mechanics*. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2001: 279-318.
- [4] WEEKS W F, CAMPBELL W J. Icebergs as a freshwater source: an appraisal[J]. *Journal of Glaciology*, 1973, 12 (65): 207-233.
- [5] HOLLAND D M, JENKINS A. Modeling thermodynamic ice-ocean interactions at the base of an ice shelf[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1999, 29(8): 1787-1800.
- [6] BIGG G R. The physics of icebergs[M]. In *Icebergs: Their Science and Links to Global Change*, 2016(3): 52-81, Cambridge University Press.
- [7] STERN A A, ADCROFT A, SERGIENKO O, et al. Modeling tabular icebergs submerged in the ocean[J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2017, 9(4): 1948-72.
- [8] FITZMAURICE A, CENEDESE C, STRANEO F. Nonlinear response of iceberg side melting to ocean currents[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(11): 5637-5644.
- [9] FITZMAURICE A, CENEDESE C, STRANEO F. A laboratory study of iceberg side melting in vertically sheared flows[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2018, 48(6): 1367-1373.
- [10] GLADSTONE R M, BIGG G R, NICHOLLS K W. Iceberg trajectory modeling and meltwater injection in the Southern Ocean[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2001, 106(C9): 19903-19915.
- [11] MARTIN T, ADCROFT A. Parameterizing the freshwater flux from land ice to ocean with interactive icebergs in a coupled climate model[J]. *Ocean Modelling*, 2010, 34(3-4): 111-124.
- [12] DORON P, BERTUCCIOLI L, KATZ J, et al. Turbulence characteristics and dissipation estimates in the coastal ocean bottom boundary layer from piv data[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2001, 31(8): 2108-2134.