

Doi: 10.11840/j.issn.1001-6392.2013.03.001

渤海莱州湾和黄河口附近海冰剪切强度的 的试验研究

季顺迎¹, 李鹏飞¹, 刘宏亮¹, 苏洁²

(1. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116023;
2. 中国海洋大学 海洋环境学院, 山东 青岛 266003)

摘 要: 剪切强度是海冰的基本力学性质, 直接影响到冰区结构物冰荷载的确定以及海冰在动力演变过程中的破坏行为。采用侧限单面剪切试验对渤海莱州湾和黄河口的海冰进行了剪切强度测试, 分析了温度、卤水体积、剪切应力率的影响。结果表明, 海冰剪切强度随冰温的降低和剪切应力率的增大而呈线性增长, 而与卤水体积的平方根呈幂函数降低。在此基础上, 综合考虑卤水体积和剪切应力率的影响, 对海冰剪切强度进行了双参数拟合, 为研究海冰剪切破坏机理提供了参考依据。

关键词: 海冰; 剪切强度; 卤水体积; 剪切应力率; 冰温

中图分类号: O346.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-6392(2013)03-0241-05

Experimental studies of the shear strength of sea ice in the Laizhou Bay and around the Yellow River Delta of Bohai Sea

Ji Shun-ying¹, Li Peng-fei¹, Liu Hong-liang¹, Su Jie²

(1. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China;
2. Ocean University of China, College of Physical and Environmental Oceanography, Qingdao 266003, China)

Abstract: The shear strength is the basic mechanical property of sea ice, and affects the ice load on offshore structures and the breakup behavior of ice cover in the sea ice dynamic process. In this paper, the shear strength of sea ice is determined through single plane shear test with lateral confinement. The ice samples were collected from the Laizhou Bay and the Yellow River Delta of Bohai Sea. The influences on sea ice shear strength of ice temperature, brine volume and shear stress rate were analyzed based on the experimental results. The shear strength increases linearly with the decreasing ice temperature and the increasing shear stress rate, while it decreases exponentially with the square root of brine volume. Moreover, the prediction function of sea ice shear strength was fitted considering the influences of both brine volume and shear stress rate comprehensively. This study provided a basis for investigating the shear failure mechanism of sea ice cover.

Keywords: sea ice; shear strength; brine volume; shear stress rate; ice temperature

在海流、海浪和潮汐等海洋动力影响下, 海冰之间及海冰与结构物之间会发生相互作用, 并伴随海冰的不断破碎和海洋结构物的持续振动。海冰的力学特性直接关系到冰区海洋结构物的安全 (Croasdale, 2012; Fortt et al, 2009)。受海岸边界

约束和海冰内力的影响, 海冰具有强烈的破碎、重叠和堆积特性 (Frankenstein et al, 1967)。基于海冰的材料性质和海洋结构物形式的多样性, 海冰会呈现屈曲、挤压、剪切、弯曲等不同的破碎模式 (Gupta et al, 2002; Marchenko et al, 2005;

收稿日期: 2012-08-09; 修订日期: 2012-11-16

基金项目: 海洋公益性行业科研专项 (2012418007, 201105016); 国家自然科学基金项目 (41176012); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (DUT12YQ02)。

作者简介: 季顺迎(1972-), 男, 博士, 教授, 主要从事工程海冰数值模式研究。电子邮箱: jisys@dlut.edu.cn。

Repetto-Llamazares, et al, 2011)。剪切破坏是海冰的基本破坏形式之一, 剪切强度是海冰的典型力学性质, 被广泛应用于复杂应力状态下海冰破碎机理的分析, 同时在工程实际中也是确定冰荷载的重要力学参数(Saeki et al, 1985; Schulson, 2002)。

由于在海冰剪切强度试验中实现纯剪切存在一定的困难, 目前国际上还没有统一的试验标准。大多采用金属或岩石的剪切试验方法, 包括单面剪切、双面剪切、带侧限单面剪切等(Schulson, 2004; Timco et al, 2010; Whillans et al, 2001; Wright et al, 2001; 丁德文, 1999)。海冰是天然的复杂材料, 其力学特性受环境因素的改变表现出多变性, 其剪切强度与晶体结构、温度、盐度等因素密切相关, 一般在 0.5~2.5 MPa 之间。海冰在垂直于生长方向的平面和平行生长方向的平面相比, 前者的剪切强度更大, 且随冰温的降低增加的更加迅速 (Fortt et al, 2009; Wright et al, 2001)。此外, 三轴压缩试验过程也涉及海冰的剪切破坏状态(李志军等, 2002; 刘维波等, 1999), 而速率变化对于海冰的剪切破坏过程分析有至关重要的作用(岳前进等, 1994)。

在我国的海冰剪切强度试验研究中, 张明元等(1995)利用双面剪切试验方法分析了不同温度及应变速率下的海冰剪切强度 (Timco et al, 2010)。此外, 侧限单面剪切试验方法的开展可以分析剪切力和侧向力的关系, 同时又能够获得双面剪切方法的纯剪切强度(内聚力)和内摩擦角, 但温度和海冰类型的选用范围并不广泛 (Whillans et al, 2001)。海冰侧限剪切强度随应变速率、温度、盐度等的变化规律在随后被深入研究 (Saeki et al, 1985)。然而, 以往的海冰剪切强度试验数据相对有限, 近期对于渤海海冰力学特性的研究工作还较少, 需要开展进一步的试验测试。

本文对渤海新生平整海冰采用侧限单面剪切的试验方法进行剪切强度测试, 并重点分析剪切强度随卤水体积(温度和盐度的函数)、剪切速率的变化规律。

1 海冰剪切强度的试验方案

1.1 测试地点及海冰的采集与加工

在 2011-2012 年冬季对渤海莱州湾及黄河口

区域的 6 个不同测试点进行了系统的海冰物理力学性质实地调查, 并对其进行了现场测试和冰样采集, 冰样采集点的分布如图 1 所示, 各测点的海冰物理性质如表 1 所示。海冰剪切强度受冰晶结构、盐度、温度、加载方向等诸多因素的影响, 在现场冰样的采集和试验中选择合理的方法很重要。本文选取近岸新生的平整固定冰为试验冰样, 以保证海冰试样具有相近的冰晶结构及 C 轴方向, 并在海冰采样过程中同步测量气温和海冰的盐度剖面。

海冰具有复杂的材料性质, 其晶体表现出各向异性, 在不同的方向上加载会呈现不同的强度。因此, 海冰试件加工制备过程中应严格保证尺寸与冰晶生长方向一致。试件尺寸为 70 mm × 70 mm × 50 mm, 加工好后需要在恒定温度下放置 24 h, 以保持海冰试样的温度均匀性。



图 1 莱州湾及黄河口海冰现场采样地点分布

表 1 莱州湾及黄河口海冰物理性质统计分析

测试点	A	B	C	D	E	F
盐度($\times 10^{-3}$)	2.27	4.10	3.53	2.25	5.78	7.45
密度(kg/m^3)	889.4	881.5	896.2	896.9	888.7	905.9

1.2 试验方法

由于海冰的脆性行为, 其抗拉强度较低, 试验中较小的拉应力将导致较大的实验误差。因此, 在试验中要避免海冰试样拉伸受力。本文采用带侧限的单面剪切试验装置(图 2), 在很大程度上避免了海冰试样拉应力的产生。为研究温度和加载速率对于冰样剪切强度的影响, 在试验前将海冰试样放置在冷冻箱中, 按照试验所需温度保温冷却 24 h, 并在低温试验机上选用不同加载速率进行测试。本

试验的海冰温度控制在-3℃~-18℃，应力率为0.03~0.2 MPa/s。

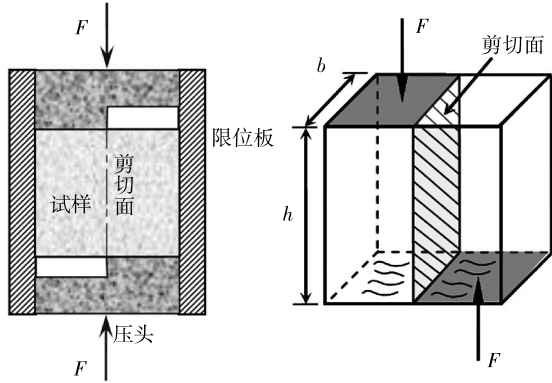


图2 海冰试样及剪切装置示意图

在试验过程中严格控制海冰试样温度，对海冰试样施加匀速荷载直至海冰被剪断，自动采集不同时刻压头作用力 F 及压头位移，同步测量和记录海冰试样的温度和盐度。海冰试样发生剪切破坏时，剪切应力达到最大值，即为剪切强度，可按式计算

$$\sigma_s = \frac{F_{max}}{bh} \tag{1}$$

式中， F_{max} 为海冰剪切破坏时的最大剪力， b 、 h 分别为试样剪切面的长度与宽度。图3为海冰剪切强度试验中一个典型的位移-剪力曲线，其中冰样的温度为-10.81℃，盐度为 3.0×10^{-3} ，加载应力率为0.14 MPa/s。

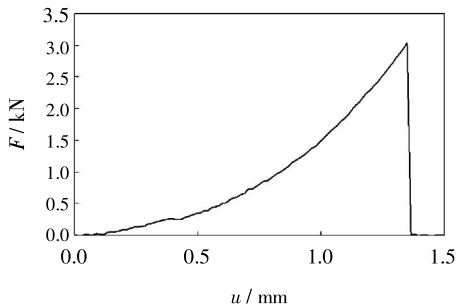


图3 海冰剪切强度测试中剪力-位移关系曲线

2 海冰剪切强度的影响因素分析

通过对莱州湾及黄河口区域的海冰进行侧限单面剪切试验测试，重点分析各因素的影响效果及强度的变化特征。由于试验中海冰的温度、盐度和加

载速率有很强的随机性，因此在进行海冰剪切强度的单因素影响分析中，忽略其他因素的影响，重点确定各单一因素与海冰剪切强度的统计特征。

2.1 温度效应

温度是决定海冰卤水体积的重要因素之一，对海冰的各项力学性质影响显著。试验结果表明，海冰剪切强度会随着温度的升高而降低 (Fortt et al, 2009; Saeki et al, 1985; Wright et al, 2001)。然而，有研究表明这种规律并非一直持续，开始阶段随着温度的降低剪切强度会表现升高的趋势，当达到最大值以后，温度继续降低时强度反而有下降趋势 (Croasdale, 2012; Timco et al, 2010)。

本文将不同温度下测得的海冰剪切强度绘于图4，发现海冰的剪切强度 σ_s 随着冰温 T_i 的降低而升高，呈现出明显的线性变化趋势。剪切强度与冰温的线性关系可以拟合为：

$$\sigma_s = -0.076T_i + 0.179 \tag{2}$$

式中， σ_s 为剪切强度 (MPa)， T_i 为海冰温度 (℃)。该式与试验数据的拟合残差 $R^2 = 0.51$ ，数据点有很大的离散性，这与海冰的加载速率、盐度及自身的冰晶结构等参数影响有关。在海冰温度对剪切强度的统计分析中，海冰试验的剪切速率在0.03~0.19 MPa/s，具有很大的取值范围。

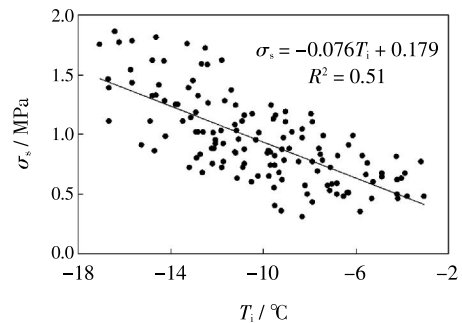


图4 冰温对海冰剪切强度的影响

2.2 卤水体积影响分析

在温度影响海冰力学性质的同时，盐度等其他因素也有改变其强度特性的能力。对于盐分高的海冰，冰内盐胞多，初始损伤显著，造成海冰强度的下降。海冰温度、盐度、密度等综合作用对海冰强度影响较大。下面对剪切强度与卤水体积的关系进行统计分析。

一般海冰的卤水体积 v_b 与海冰温度 T_i 和海冰盐度 S_i 的关系为 (Frankenstein et al, 1967)：

$$v_b = S_i \left(0.532 + \frac{49.185}{|T_i|} \right) \quad (3)$$

式中, S_i 为海冰盐度, $-0.5^\circ\text{C} \geq T_i \geq -22.9^\circ\text{C}$ 。

根据以往研究获得的剪切强度与卤水体积的关系, 对 σ_s 与进行幂函数关系拟合得到:

$$\sigma_s = 0.18 \sqrt{v_b}^{-0.80} \quad (4)$$

该式的拟合情况如图 5 所示, 其拟合残差 $R^2 = 0.50$ 。由于该式是对所有试验结果在不同剪切速率下确定的, 其对剪切速率具有很强的适用范围。

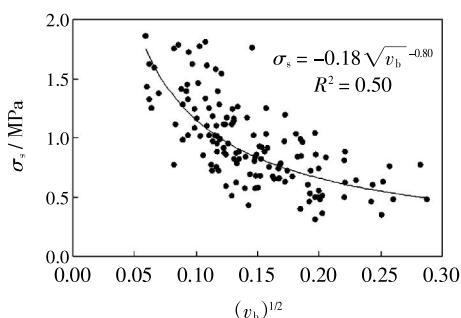


图 5 卤水体积对海冰剪切强度的影响

2.3 剪切速率影响分析

海冰力学性质与加载速率有着明显的对应关系, 不同应力率下的海冰强度差异很大。海冰弯曲强度、压缩强度等都与加载速率存在相应关系, 剪切强度也存在同样的现象, 但以往的研究获得的结果并不一致。

对辽东湾平整冰侧限剪切试验的结果表明, 极限剪切强度随剪切应变速率的增加而增大, 在达到最大值以后, 剪切强度转为下降趋势。但有研究指出, 剪切速率和应力率对剪切强度的影响并不显著 (Wright et al, 2011), 而且还有随应力率的增加而降低的结论 (Croasdale, 2012)。

本文试验得到的海冰剪切强度与加载速率的关系如图 6 所示, 并通过线性拟合得出:

$$\sigma_s = 7.51\dot{\tau} + 0.28 \quad (5)$$

式中, $\dot{\tau}$ 为剪切应力率 (MPa/s)。该式与试验结果的拟合残差 $R^2 = 0.54$ 。由以上分析可知, 卤水体积对海冰剪切强度的影响也比较大。由于图 6 未考虑卤水体积的影响, 因此试验数据存在一定的离散性。

2.4 卤水体积和剪切应力速率的双因素影响

从以上单因素分析中发现, 海冰剪切强度与海冰温度、卤水体积和剪切速率具有密切的对应关系, 因此需进行多个影响因素的综合分析。由于卤

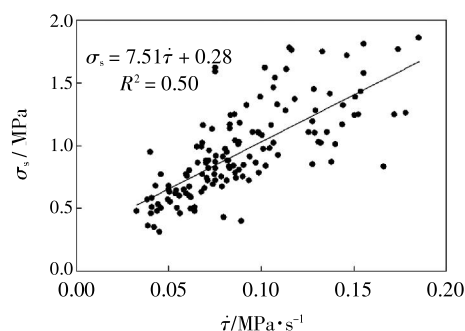


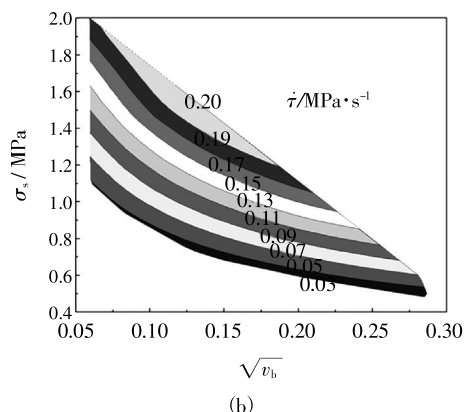
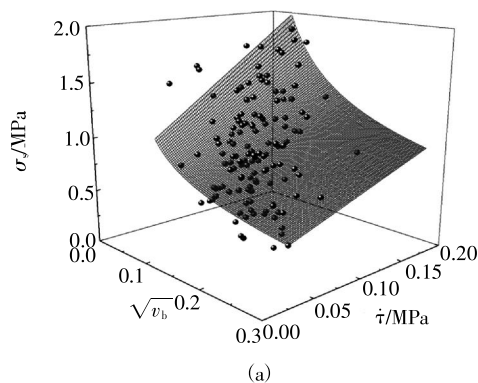
图 6 剪切应力速率对海冰剪切强度的影响

水体积是海冰温度和盐度的函数, 因此在进行多因素分析时, 主要考虑卤水体积和剪切应力速率的影响。

依据以上分析中海冰剪切强度与卤水体积平方根和剪切应力率分别呈幂函数关系和线性关系, 将 $\sqrt{v_b}$ 、 $\dot{\tau}$ 、和 σ_s 进行曲面拟合, 同时投影得到的等值线如图 7 (a) - (c) 所示, 其拟合关系式为:

$$\sigma_s = (0.21 + 1.71\dot{\tau}) \sqrt{v_b}^{-0.473} \quad (6)$$

该式表明剪切强度 σ_s 随卤水体积平方根 $\sqrt{v_b}$ 的增加而降低, 呈幂函数关系; σ_s 随剪切应力率 $\dot{\tau}$ 的增加而升高, 呈线性变化关系。上式与试验结果拟合的残差 $R^2 = 0.76$, 可更为准确地反映出 σ_s 和 $\sqrt{v_b}$ 、 $\dot{\tau}$ 的关系。由此可见, 相比于单因素影响分



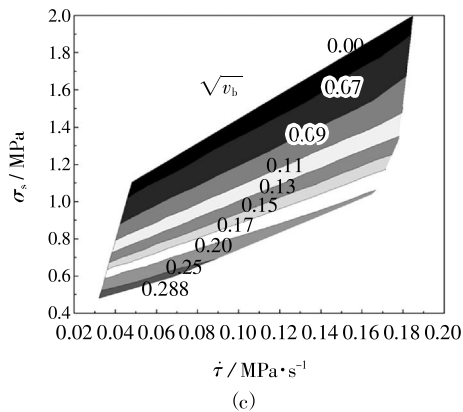


图 7 卤水体积和剪切应力速率对海冰剪切强度的影响

析, 等值线图 7 (b) 和 (c) 较合理地反映了卤水体积和剪切速率的共同影响。

3 结语

剪切强度是海冰材料的基本力学特性之一, 剪切破坏属于海冰与海洋结构的相互作用及海冰断裂成脊中的典型破坏形式。本文针对渤海莱州湾及黄河口区域的海冰开展侧限条件下的单面剪切试验, 重点分析剪切强度随不同影响因素的变化趋势, 确定了海冰剪切强度的基本特性。结果表明, 海冰具有复杂的材料特性, 受物理及加载条件的影响其剪切强度表现出很强的多变性。海冰剪切强度随温度增加而降低, 随剪切应力率的增大而升高, 均近似呈线性关系; 与卤水体积平方根呈幂函数降低关系。最后, 拟合分析得到了相应的函数关系式。本文研究为分析海冰基本力学特性和确定冰荷载提供了一定的借鉴。

致谢: 大连理工大学工程力学系研究生陈晓东、邵帅等同学参加了现场海冰试样的采集工作, 本文试验测试得益于大连理工大学工程力学系毕祥军副教授和刘增利高工的有益讨论, 在此深表谢意!

参 考 文 献

- Croasdale K R, 2012. Ice rubbing and ice interaction with offshore facilities. *Cold Regions Science and Technology*, 76-77: 37-43.
- Fortt A L, Schulson E M, 2009. Velocity-dependent friction on Coulombic shear faults in ice. *Acta Materialia*, 57: 4382-4390.
- Frankenstein G, Garner R, 1967. Equations for determining the brine volume sea ice from -0.5°C to -22.9°C . *Journal of glaciology*, 6 (48): 943-944.
- Gupta V, Bergstrom J S, 2002. A progressive damage model for failure by shear faulting in polycrystalline ice under biaxial compression. *International Journal of Plasticity*, 18: 507-530.
- Marchenko A, Makshtas A, 2005. A dynamic model of ice ridge buildup. *Cold Regions Science and Technology*, 41: 175-188.
- Repetto-Llamazares A H V, Høyland K V, Karl-Ulrich, 2011. Experimental studies on shear failure of freeze-bonds in saline ice: Part I: Set-up, failure mode and freeze-bond strength. *Cold Regions Science and Technology*, 65: 286-297.
- Saeki H, Ono T, 1985. Experimental study on direct shear strength of sea ice. *Annals of Glaciology*, 6: 218-221.
- Schulson E M, 2002. Compressive shear faults in ice: plastic vs. Coulombic faults. *Acta Materialia*, 50: 3415-3424.
- Schulson E M, 2004. Compressive shear faults within arctic sea ice: Fracture on scales large and small. *Journal of Geophysical Research*, 109, C07016.
- Timco G W, Weeks W F, 2010. A review of engineering properties of sea ice. *Cold Regions Science and Technology*, 60: 107-129.
- Whillans I M, Merry C J, 2001. Analysis of a shear zone where a tractor fell into a crevasse, western side of the Ross Ice Shelf, Antarctica. *Cold Regions Science and Technology*, 33: 1-17.
- Wright B D, Timco G W, 2001. First-year ridge interaction with the Molikpaq in the Beaufort Sea. *Cold Regions Science and Technology*, 32: 27-44.
- 丁德文, 1999. 工程海冰学概论. 北京: 海洋出版社.
- 李志军, 孟广琳, 高树刚, 等, 2002. 辽东湾 S2 冰侧限剪切强度的试验研究. *海洋工程*, 20(1): 20-24.
- 刘维波, 李光伟, 王鲁云, 1999. 用扭转试验研究淡水冰的剪切强度及模量. *大连理工大学学报*, 39(1): 31-33.
- 岳前进, 周新安, 沈梧, 等, 1994. 海冰侧限剪切强度试验方法. *冰川冻土*, 16(1): 75-79.
- 张明元, 孟广琳, 严德成, 1995. 渤海湾海冰及黄河口河冰的剪切性质. *海洋学报*, 17(3): 92-95.

(本文编辑: 李晓光)