

渤海海冰断裂韧度试验

季顺迎¹, 刘宏亮¹, 许 宁², 马红艳¹

(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. 国家海洋环境监测中心, 辽宁 大连 116024)

摘要:海冰的断裂韧度是近海结构冰荷载分析的重要参数,也是影响海冰断裂、重叠和堆积等动力行为的主要力学特性。2011—2012年冬季现场采集了渤海莱州湾的海冰试样,在室内低温环境下通过三点弯曲试验测得了不同温度、盐度和加载速率下的海冰断裂韧度 K_{IC} 。结果表明,卤水体积(温度和盐度)和加载速率对 K_{IC} 的影响比较显著。随温度和加载速率的降低, K_{IC} 值均会增大,且与卤水体积的平方根呈负指数关系。为极限破坏状态下海冰的断裂过程和冰荷载分析的参数选用提供了依据。

关键词:海冰;断裂韧度;卤水体积;冰温;加载速率

中图分类号: O346.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-6791(2013)03-0386-06

海冰物理力学性质是海洋结构设计和海冰动力学分析的重要参数。海上大面积浮冰、冰脊、重叠冰等在大气和海洋条件的外界驱动下,以及与工程结构物的相互作用中均会发生断裂^[1-2]。冰内杂质、气泡及微裂隙等在不同程度上影响海冰的力学性质^[3-4]。海冰破坏有多种不同模式,其中海冰断裂是一种典型且广泛存在的破坏形式。因此,开展海冰断裂韧度的试验研究工作对于海冰工程来说不仅重要而且迫切。

海冰的断裂韧度依赖于加载速率和海冰类型,同时与海冰试样尺寸密切相关。Dempsey等^[5]采用不同尺寸冰样进行断裂测试,得到较厚冰样的断裂韧度 K_{IC} 值在 $250 \text{ kPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 左右,明显高于其他研究者采用较小尺寸冰试样获得的海冰断裂韧度 K_{IC} 。在试验方法上,海冰断裂试验主要是采用三点弯曲试验^[6-7]。受冰晶结构的影响,海冰中裂纹为垂直方向的 K_{IC} 要明显低于其为水平方向的 K_{IC} ^[8]。此外,海冰的 K_{IC} 大小与裂纹尖端的尖锐程度密切相关,断裂韧度会随着尖锐程度的提高而减小^[9]。

中国有关海冰断裂韧度的研究,主要采用三点弯曲和反对称四点弯曲方法系统地讨论了温度和加载速率的影响,得到的 K_{IC} 值为 $11 \sim 77 \text{ kPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ^[10]。对于天然淡水冰, K_{IC} 会随尖端裂纹应变速率的增大呈下降趋势,且在高速率下断裂韧度的温度效应并不显著^[11-12]。但由于不同海域的海冰盐度差别比较大,在自然条件下又有很大的温度变化幅度,利用卤水体积综合反映海冰温度和盐度对其力学性质的影响更加合理^[13]。因此,通过试验确定不同卤水体积条件下的 K_{IC} 值,并考虑加载速率的影响有助于深入揭示海冰基本力学性质的变化规律。

本文通过对2011—2012年冬季莱州湾海冰试样的断裂韧度试验研究,重点分析海冰卤水体积(温度和盐度)、加载速率对断裂韧度的影响,确定 K_{IC} 的基本特征。

1 海冰断裂韧度的冰样采集及试验方案

1.1 海冰试样的采集及加工

2011—2012年冬季,对渤海莱州湾进行了系统的海冰物理力学性质现场测试和冰样采集。冰样采集中,选择含杂质少且平整固定冰作为冰样,并在采样、运输和存储过程中采取专门措施保持海冰的原始性质。本文所研究的海冰试样平均密度为 897 kg/m^3 ,平均盐度为 0.463% 。

在试样制备过程中,将采集的冰样,按照预计的尺寸要求用带锯精加工成 $280 \text{ mm} \times 70 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 的试

收稿日期: 2012-05-15; 网络出版时间: 2013-03-27

网络出版地址: <http://www.cnki.net/KCMS/detail/32.1309.P.20130327.1513.009.html>

基金项目: 国家海洋公益性行业科研专项经费资助项目(201105016); 国家自然科学基金资助项目(41176012)

作者简介: 季顺迎(1972-),男,河北武邑人,教授,博士,主要从事工程海冰数值模式研究。

E-mail: jisy@dlut.edu.cn

件。试件的长轴平行于冰面,且试件上侧为海冰的上表面。由于海冰的断裂韧度与裂纹的尖锐程度密切相关^[9],因此在加工好的冰样中选出尺寸完好的试件,在下侧面的中部沿原始冰的厚度方向切出 30 mm 深的切口,且具有尖端裂纹,其尖锐程度需要有较好的保证。

1.2 海冰断裂韧度的试验方法

本试验利用典型的三点弯曲试验装置,在低温试验机上完成。海冰试样的加载方式及结构尺寸如图 1 所示,其中 L 、 h 和 b 分别为冰样长度、高度和宽度; L_0 为加载间距, a 为初始裂缝高度, F 为施加荷载。为研究温度和加载速率的影响,在测试前将海冰试样冷却到设定温度,并在低温试验机上采用不同加载速率进行测试。试验过程中严格控制海冰试样温度,对海冰试样施加荷载直至冰样断裂,并且记录不同时刻的作用力和位移。本试验的海冰温度控制在 $-3^{\circ}\text{C} \sim -18^{\circ}\text{C}$,位移加载速率包括 5 种,即 0.5 mm/min、1.0 mm/min、2.0 mm/min、4.0 mm/min 和 6.0 mm/min。

海冰试样在试验前先放到冷冻箱中按照试验所需的温度保温 24 h,每个试样在试验中均测量其试验温度和盐度。典型的海冰断裂测试中的力-时间曲线如图 2 所示,其中冰样的温度为 -8.5°C ,盐度为 4.5×10^{-3} ,加载速率为 2.0 mm/min。

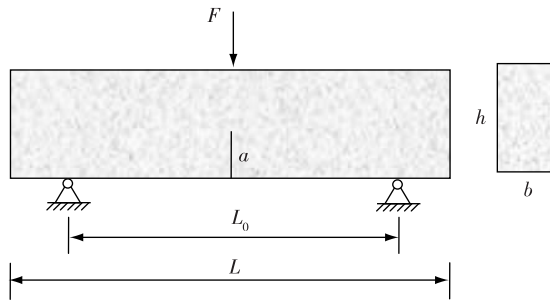


图 1 海冰断裂试验的三点弯曲示意图

Fig. 1 Sketch of sea ice fracture test with three loading points

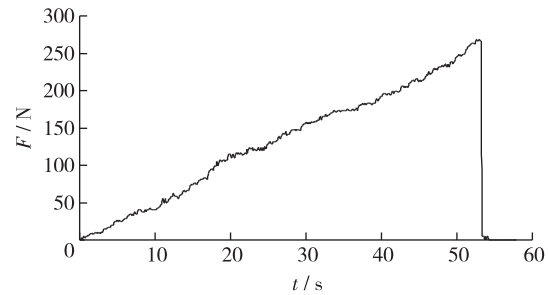


图 2 海冰断裂韧度测试的力-时间曲线

Fig. 2 Load-time curve in fracture toughness test of sea ice

1.3 海冰断裂韧度的推算

海冰平面应变断裂韧度是在平面应变和小变形范围屈服条件下,张开型裂纹发生失稳扩展时的临界应力强度因子。它表征材料在线弹性范围内,具有初始裂纹时抵抗断裂的能力。对不同尺寸的海冰断裂试验结果对比后,发现尺寸相差较大的冰体之间所求得断裂韧度值的范围存在一定的差异^[14]。而 Guinea 等^[15]深入讨论了三点弯曲试验中应力强度因子的一般性确定方法。

对于 $3 \leq L_0/h \leq 5$, 且 $0.4 \leq a/h \leq 0.6$ 的非常规尺寸试样,应力强度因子可采用下式确定^[16]:

$$K_I = \frac{FL_0}{4bh^{3/2}} y\left(\frac{a}{h}\right) \quad (1)$$

$$y\left(\frac{a}{h}\right) = \left[7.30 + 0.21 \sqrt{\frac{L_0}{h} - 2.9}\right] \sec\left(\frac{\pi a}{2h}\right) \sqrt{\tan \frac{\pi a}{2h}} \quad (2)$$

式中 F 为施加的荷载, kN; L_0 、 b 、 h 分别为跨距长度、试样宽度、高度, m; K_I 为张开型裂纹的应力强度因子, $\text{kPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。当 K_I 达到临界值时,裂纹就会失稳扩展而发生断裂,这个 K_I 的临界值就是断裂韧度 K_{IC} 。因为海冰的断裂是脆性破坏,所以临界荷载即是试验的最大荷载 $F_{\max}$ 。

Mulmule 和 Dempsey^[17]讨论了海冰断裂韧度试验中线弹性断裂的尺寸要求,并指出当海冰试样不满足尺寸条件时所确定的 K_{IC} 不能代表真实的海冰材料属性。而对于平面应变断裂韧度的测试研究,裂纹尖端的塑性区变形尺寸一定要远小于试样的其他尺寸,当加载速率和试样的厚度减小到一定程度时,都会使之转变为平面应力状态^[16]。所以,为满足平面应变和小范围屈服条件,试样尺寸要求^[10,16]:

$$a \geq 2.5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_t} \right)^2 \quad b \geq 2.5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_t} \right)^2 \quad h - a \geq 2.5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_t} \right)^2 \quad (3)$$

式中 σ_t 为海冰抗拉强度。经有效性检验后, 满足条件的 K_{IC} 才是海冰的平面应变断裂韧度。

2 海冰断裂韧度的试验分析

海冰断裂韧度受冰晶结构、卤水体积(温度和盐度)和加载速率等诸多因素的影响。以往研究大多只考虑单因素的影响, 实际上海冰的断裂韧度是诸多影响因素耦合作用的结果。为确定卤水体积和加载速率对海冰 K_{IC} 的影响, 本文依据测试结果对海冰断裂韧度的影响因素进行分析。

2.1 海冰温度的影响

温度是决定海冰卤水体积的两个重要因素之一, 并对海冰的各力学性质有显著影响。将不同温度下的海冰断裂韧度值绘于图 3, 可以发现 K_{IC} 与海冰温度 T 具有明显的线性关系, 即温度越低, 海冰断裂韧度越大。 K_{IC} 与 T 的拟合关系为

$$K_{IC} = -9.293T + 76.366 \quad (4)$$

式中 T 为海冰温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

2.2 卤水体积的影响

海冰的物理力学性质影响因素中, 卤水体积的影响较为显著。Timco 和 Frederking^[18] 分别分析了海冰和淡水冰的 K_{IC} , 发现随着卤水体积的增大断裂韧度明显减小。一般海冰的卤水体积 V_b 与海冰温度 T 和海冰盐度 S 的关系为^[13]

$$V_b = S \left(0.532 + \frac{49.185}{|T|} \right) \quad -22.9^{\circ}\text{C} \leq T \leq -0.5^{\circ}\text{C} \quad (5)$$

式中 S 为海冰盐度。

大量研究表明, 海冰的弯曲强度、拉伸强度及压缩强度等强度参数与卤水体积的平方根呈负指数关系^[4, 19-20]。基于本文的海冰断裂韧度试验结果如图 4 所示, 对 K_{IC} 与 $\sqrt{V_b}$ 按负指数关系进行拟合得到。

$$K_{IC} = 301.61 e^{-4.28\sqrt{V_b}} \quad (6)$$

从图 4 可以看到, 海冰断裂韧度随卤水体积平方根 $\sqrt{V_b}$ 的增加快速降低, 并大体呈负指数关系, 但拟合曲线的离散性相对较大。这一方面源于海冰断裂韧度试验的随机性, 同时也与海冰加载速率、冰晶结构等参数相关。

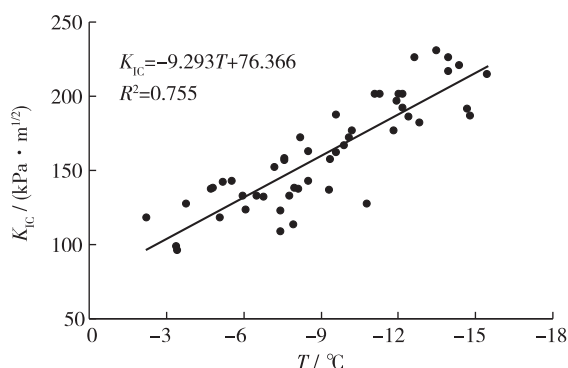


图 3 海冰温度对海冰断裂韧度 K_{IC} 的影响

Fig. 3 Influence of sea ice temperature on fracture toughness K_{IC}

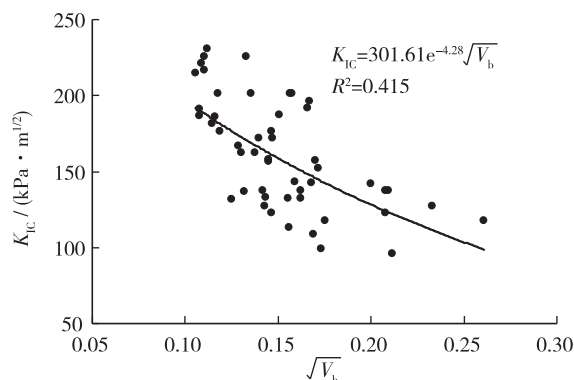


图 4 海冰卤水体积对海冰断裂韧度 K_{IC} 的影响

Fig. 4 Influence of sea ice brine volume on fracture toughness K_{IC}

2.3 加载速率的影响

海冰力学性质同加载速率的关系一直是工程海冰的研究重点。一般 K_{IC} 会随着加载速率的减小而增大, 原因是在尖端裂纹处应力的松弛和材料蠕变的影响^[3,10]。但 Nixon 和 Schulson^[21] 的研究表明这种变化规律并非满足于全部加载速率范围。当速率高于某个临界值后, 断裂韧度变化并不明显, 而如果加载速率小到一定程度, 就会由平面应变到平面应力状态的转变。本文通过每个海冰试样测试得到的力-时间曲线确定相应的加载速率 $\dot{F}$ 。根据上面的分析, K_{IC} 与 $\sqrt{V_b}$ 呈负指数关系, 可以假设有如下关系:

$$K_{IC} = (a + b\dot{F})e^{(c+d\dot{F})\sqrt{V_b}} \quad (7)$$

式中 a 、 b 、 c 和 d 均为待拟合参数, 可依据试验数据拟合。基于本文在不同加载速率和卤水体积下的试验结果得到:

$$K_{IC} = (294.12 + 1025.92\dot{F})e^{(-3.58-33.4\dot{F})\sqrt{V_b}} \quad (8)$$

式(8)的拟合曲面及等值线如图5和图6所示。图5中深色数据点和浅色数据点分别表示位于拟合曲面两侧的部分, 图6(a)和图6(b)分别从不同角度反映出 K_{IC} 与 $\sqrt{V_b}$ 和 $\dot{F}$ 的对应关系, 可更加充分表现海冰断裂韧度的变化规律。从图6(a)可以看出, 随着加载速率的增大, K_{IC} 会随之降低。对比图(4)的结果, 图6(b)可以更详尽地反应出海冰的断裂韧度随 $\sqrt{V_b}$ 呈负指数降低的同时, 加载速率 $\dot{F}$ 的影响。

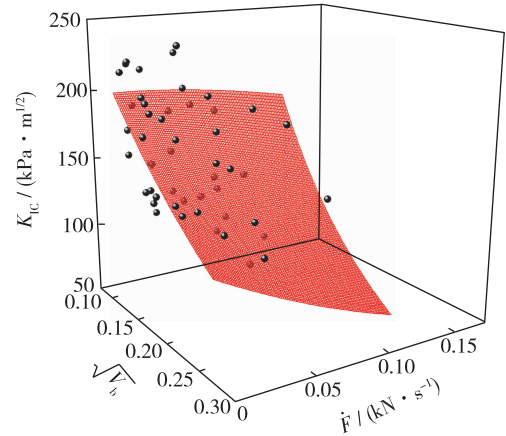


图5 不同卤水体积和加载速率下海冰断裂韧度的拟合曲面

Fig. 5 Fitted curve of sea ice fracture toughness under various brine volumes and loading rates

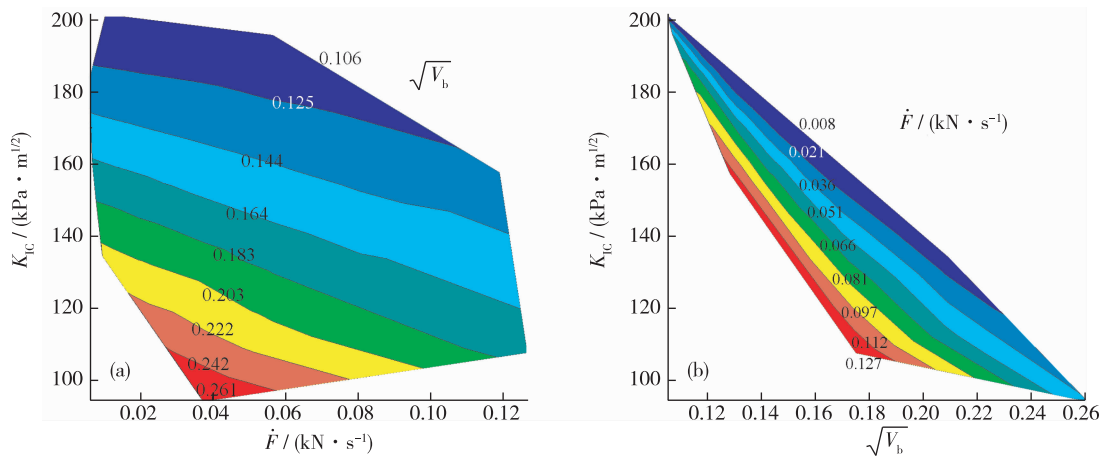


图6 海冰加载速率和卤水体积对断裂韧度的影响

Fig. 6 Influences of loading rate and brine volume on sea ice fracture toughness

3 结 论

通过对渤海莱州湾海冰进行断裂韧度试验, 重点分析了海冰温度、加载速率和卤水体积对海冰断裂韧度的影响。结果表明, 海冰断裂韧度 K_{IC} 与卤水体积的平方根 $\sqrt{V_b}$ 呈负指数关系, 与温度 T 呈近似线性关系; K_{IC} 会随着加载速率 $\dot{F}$ 的增大而降低。由此可见, 温度越低, 卤水体积越小, 加载速率越慢, 则海冰的 K_{IC} 就

越大。本文确定了卤水体积和加载速率共同影响下 K_{IC} 的拟合关系式, 可为工程海冰研究提供借鉴。

目前开展的海冰断裂韧度试验研究还十分有限, 断裂韧度随冰层内深度的变化、尺寸效应以及尖端裂纹的影响等方面将是今后研究的重点。

致谢: 大连理工大学工程力学系研究生李鹏飞、陈晓东、邵帅等同学参加了现场海冰试样的采集工作, 本文工作得益于大连理工大学工程力学系李锋副教授和刘增利高级工程师的指导, 在此深表谢意!

参考文献:

- [1] KORSNES R, SOUZA S R, DONANGELO R, et al. Scaling in fracture and refreezing of sea ice[J]. *Physica A*, 2004, 331: 291-296.
- [2] JEROME W. Fracture and fragmentation of ice: A fractal analysis of scale invariance [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2001, 68: 1975-2012.
- [3] 丁德文. 工程海冰学概论[M]. 北京:海洋出版社,1999. (DING Dewen. Engineering sea ice introduction[M]. Beijing: Ocean Press, 1999. (in Chinese))
- [4] TIMCO G W, WEEKS W F. A review of engineering properties of sea ice [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2010, 60: 107-129.
- [5] DEMPSEY J P, DEFRANCO S J, ADAMSON R M, et al. Scale effects on the in-situ tensile strength and fracture of ice, Part I: Large grained freshwater ice at Spray Lakes Reservoir, Alberta [J]. *International Journal of Fracture*, 1999, 95: 325-345.
- [6] KAMIO Z, MATSUSHITA H, STRNADEL B. Statistical analysis of ice fracture characteristics [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2003, 70: 2075-2088.
- [7] XU X, JERONIMIDIS G, ATKINS A G. Rate-dependent fracture toughness of pure polycrystalline ice [J]. *Journal of materials science*, 2004, 39: 225-233.
- [8] STEHN L M, DEFRANCO S J, DEMPSEY J P. Orientation effects on the fracture of pond (S1) ice[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1995, 51(3): 431-445.
- [9] DEFRANCO S J, DEMPSEY J P. Crack propagation and fracture resistance in saline ice [J]. *Journal of Glaciology*, 1994, 40 (136): 451-462.
- [10] 张明元, 孟广琳, 严德成, 等. 海冰平面应变断裂韧度[J]. *海洋与湖沼*, 1989, 20(4): 338-342. (ZHANG Mingyuan, MENG Guanglin, YAN Decheng, et al. Plane strain fracture toughness K_{IC} of sea ice [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1989, 20 (4): 338-342. (in Chinese))
- [11] 张小鹏, 陈凯, 李锋, 等. 天然淡水冰断裂韧度的试验研究[J]. *冰川冻土*, 2010, 32(5): 960-963. (ZHANG Xiaopeng, CHEN Kai, LI Feng, et al. Experimental study of the fracture toughness of natural freshwater ice [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(5): 960-963. (in Chinese))
- [12] 李锋, 马红艳. 断裂力学在冰工程中的应用[J]. *冰川冻土*, 2010, 32(1): 139-150. (LI Feng, MA Hongyan. Application of fracture mechanics to ice engineering [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(1): 139-150. (in Chinese))
- [13] FRANKENSTEIN G, GARNER R. Equations for determining the brine volume of sea ice from -0.5°C to -22.9°C [J]. *Journal of Glaciology*, 1967, 6(48): 943-944.
- [14] MULMULE S V, DEMPSEY J P. Scale effects on sea ice fracture [J]. *Mechanics of Cohesive-frictional Materials*, 1999, 4: 505-524.
- [15] GUINEA G V, PASTOR J Y, PLANAS J, et al. Stress intensity factor, compliance and CMOD for a general three-point-bend beam [J]. *International Journal of Fracture*, 1998, 89: 103-116.
- [16] 李洪升, 朱元林. 冻土断裂力学及其应用[M]. 北京:海洋出版社,2002. (LI Hongsheng, ZHU Yuanlin. Fracture mechanics of frozen soil and its application[M]. Beijing: Ocean Press, 2002. (in Chinese))
- [17] MULMULE S V, DEMPSEY J P. LEFM size requirements for the fracture testing of sea ice [J]. *International Journal of Fracture*, 2000, 102: 85-98.
- [18] TIMCO G W, FREDERKING R M W. Flexural strength and fracture toughness of sea ice [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 1982, 8: 35-41.

- [19] JI Shunying, WANG Anliang, SU Jie, et al. Experimental studies on elastic modulus and flexural strength of Sea Ice in the Bohai Sea[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2011, 25(4): 182-195.
- [20] KOVACS A. Estimating the full-scale flexural and compressive strength of first-year sea ice [J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102(C4): 8681-8689.
- [21] NIXON W A, SCHULSON E M. A micromechanical view of the fracture toughness of ice [J]. Journal de Physique, 1987, 3(48): 313-319.

Experiments on sea ice fracture toughness in the Bohai Sea*

JI Shunying¹, LIU Hongliang¹, XU Ning², MA Hongyan¹

(1. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China;

2. National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116024, China)

Abstract: The fracture toughness of sea ice is an important parameter to analyze ice load on offshore structures, and also affects the sea ice dynamics, such as sea ice breakage, rafting and ridging, etc. In this study, sea ice samples were collected in the Liaodong Bay of Bohai Sea in the winter of 2011—2012. The values of sea ice fracture toughness K_{IC} were tested under different ice temperatures, salinities and loading rates with bending tests of three loading points. The results show that the brine volume (as a function of sea ice temperature and salinity), and the loading rate have obvious influences on the value of K_{IC} . The value of K_{IC} decreases with either increasing ice temperature or loading rate. It has a negative exponential relation with the square root of brine volume. The results of this study will be a reference to study the fracture process of sea ice cover under ultimate conditions, and can also be applied to analyze ice load on offshore structures.

Key words: sea ice; fracture toughness; brine volume; ice temperature; loading rate

论文优先数字出版说明

为即时确认作者科研成果、彰显论文传播利用价值,从2011年1月起,将在《水科学进展》印刷版期刊出版的定稿论文优先在“中国知网”(http://www.cnki.net)以数字出版方式提前出版(优先数字出版)。欢迎读者在中国知网“中国学术期刊网络出版总库”检索、引用本刊作者最新研究成果。

《水科学进展》编辑部

* The study is financially supported by the National Non-Profit Research Program of China (No. 201105016) and the National Natural Science Foundation of China (No. 41176012).