

海冰平面应变断裂韧度 K_{IC}

张明元 孟广琳 严德成 于永海

(国家海洋局海洋环境保护研究所, 大连)

提要 试验测得海冰平面应变断裂韧度(K_{IC})范围为 11—77 $\text{kN}/\text{m}^{3/2}$, 平均值为 32 $\text{kN}/\text{m}^{3/2}$ 。由试验结果得知海冰的断裂韧度与加载速度、冰晶颗粒、试验温度有密切的关系。这些因素对应力强度因子 K_{IC} 临界值有较大影响。结果表明, 当加载速度增大时, K_{IC} 值减小; 当温度升高时, K_{IC} 值减小。

平面应变断裂韧度 (K_{IC}) 是材料在平面应变和小范围屈服条件下, I 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, 带裂纹工作时抵抗断裂的能力, 是材料固定的一种力学性质^[1]。因为平面应变状态是实际工程结构中最危险的工作状态, 所以 K_{IC} 是工程安全设计的重要依据。在过去的研究中, 使用没有加工上切口并预制裂纹的试样作材料强度性质的试验, 不可能详细地给出这些裂纹对材料强度数据影响。

早在 1920 年 Griffith^[4]假设应变能量释放率达到或超过需要形成新的裂纹的临界能量时, 裂纹开始传布。20 多年后 Orowan^[7]和 Irwin^[6]建议粘性材料裂纹传布所做功的值等于表面能量和粘弹性流动所做功的总和。由于这是基于能量分析得出的概念, 具有普遍意义, 因而奠定了断裂力学的理论基础。断裂力学是一门新兴科学, 开始时仅应用于金属, 而应用于海冰则较晚。国际上, 1963 年 Gold^[3]用热冲击法在冰板上形成冰裂纹, 开始了冰断裂力学的研究。Liu, H. W. 和 Loop, S. P. W. 发表了“淡水冰的断裂韧度”一文, 得出了 K_{IC} 随着试验温度和加载率减小而增大的结果。1977 年, 英国 Goodman 作了关于河冰和海冰的蠕变断裂和表面应变测量。1979 年, 加拿大 Hamaza^[2]发表了淡水冰平面应变断裂韧度 (K_{IC})。1980 年, 日本的 Urabe, N. 等人发表了海冰断裂韧度的文章^[10]。我国断裂力学应用于海冰方面的研究刚刚开始。1986 年, 沈梧等人在第五届近海力学与极区工程 (OMAE) 会议论文集上发表了“渤海海冰的断裂韧度”论文^[9]。

一、测试方法

本试验基本上采用的是美国 1981 年颁布的 E₃₉₉₋₈₁ 最新标准试验方法。

1. 试样型式

海冰 K_{IC} 常用的标准试样有两种: 三点弯曲梁和紧凑拉伸试件^[8]。本试验选用三点弯曲梁, 具有以下几个优点: (1) 试验装置简单, 可利用现有的设备; (2) 试件加工较简单, 对中较容易; (3) 三点弯曲试样的重要特性是 $BE' \cdot G(1 - a/W)^2$ 的稳定性, 因而

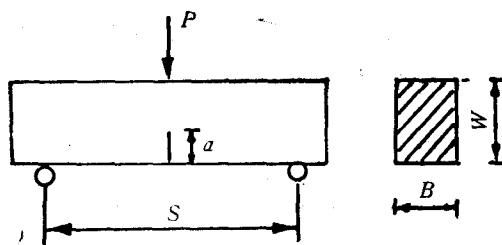


图1 三点弯曲试样

Fig. 1 3-point curved test sample

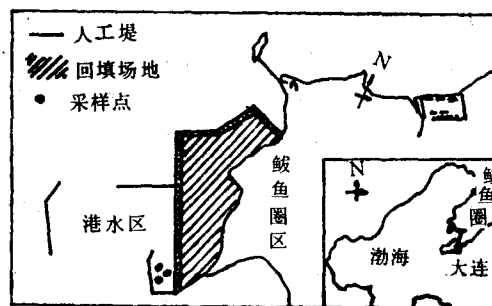


图2 采样地点

Fig. 2 Location of sampling

使得三点弯曲试样在 J 积分的分析特别优越^[1]。三点弯曲试样型如图1所示。

2. 试样的制备

为了使冰样不受外界的影响,以保持天然条件下状态,我们于1987年1月在辽东湾沿岸海区进行了海冰 K_{IC} 的现场测试。实验室设置在鲅鱼圈新港池边,在港池里采取冰样。位置参见图2。

采样时间选在盛冰期。当时港池的冰厚约为40cm。同时测量冰温、盐度、密度和冰晶结构,以便保持海冰的原来性质。

本试验共选取三组原冰,皆为平整固定冰。分别标记为 F_{87-1} , F_{87-2} , F_{87-3} 。 F_{87-1} 号冰,冰晶颗粒较小,直径为3mm。 F_{87-2} , F_{87-3} 号冰冰晶颗粒大小差不多,比 F_{87-1} 号冰颗粒大些,约为5mm。制做冰样时,首先在冰板上用汽油锯将原冰切割下来。嗣后,把大冰块用圆盘电锯精心加工成标准试样。试样尺寸为 $10 \times 10 \times 60(\text{cm}^3)$ 。每组试样为5个,加工成形的试样放入低温冰箱里,放置一天或更长的时间,使其充分冷冻,达到热平衡,以备试验之用。在试验前,把试样单边切口,仔细测量切口深度、厚度、宽度、跨度、跨高比,以及样品尺寸。测量完毕,然后按照 E_{399-81} 方法进行试验。

3. 试验仪器设备

此试验是在海洋仪器研究所研制的海冰压力试验机上进行的。该机配备了荷重传感器 ZW-11 型位移计、x-y 函数记录仪和三笔记录仪等。荷载量的电量先经动态电阻应变仪放大,再输入到记录仪上记录加载速度 $v-t$,荷载量 $p-t$,压力-形变 $p-v$ 曲线。

二、试验结果与讨论

对三种不同类型的冰,分5种温度(267,263,261,255,248K),使用了6种加载速度(2.4×10^{-4} , 1.3×10^{-3} , 2.5×10^{-3} , 4.5×10^{-3} , 7.6×10^{-3} , $2.8 \times 10^{-2} \text{cm/s}$)进行了试验,共做了130个试样。

K_{IC} 的值用下式计算^[2]。

$$K_{IC} = (P_0 S / BW^{3/2}) \cdot f(a/W) (\text{N/mm}^{3/2})$$

式中,

$$f(a/W) = \frac{3(a/W)^{1/2} [1.99 - (a/W)(1 - a/W)(2.15 - 3.93a/W + 2.7a^2/W^2)]}{2(1 + 2a/W)(1 - a/W)^{3/2}}$$

P_Q 为实验确定的最大断裂荷载 (N); B 为试样厚度 (mm); S 为弯曲支座跨度 (mm); W 为试样宽度 (mm); a 为裂缝长度 (mm)。

通过测试计算所得的 K_{IC} 结果, 最大值为 $77\text{kN/m}^{3/2}$, 最小值为 $7\text{kN/m}^{3/2}$, 多数为 $20\text{--}40\text{kN/m}^{3/2}$ 之间。试验结果详见表 1, 表中值是 5 个数据的平均值。

表 1 海冰的 $K_{IC}(\text{kN/m}^{3/2})$

Tab. 1 Plane strain fracture toughness of sea ice

温度(K) $K_{IC}(\text{kN}/\text{m}^{3/2})$ 加载速度 (cm/s)	267			263			261			255			248		
	F_{87-2}			F_{87-2}			F_{87-3}			F_{87-2}			F_{87-1}		
	K_{IC}			K_{IC}			K_{IC}			K_{IC}			K_{IC}		
	最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均
2.4×10^{-4}	23	11	17	54	38	43	77	28	47	75	35	59			
1.3×10^{-3}	31	13	21	49	18	25	50	25	32	46	26	35	55	12	29
2.5×10^{-3}	44	26	36	57	28	34	48	32	36	36	18	25	43	13	28
4.5×10^{-3}				49	47	48	36	7	25	37	18	25	26	18	23
7.6×10^{-3}	33	16	25	57	41	50				37	14	23	33	19	28
2.8×10^{-2}				36	24	27	36	24	27				27	12	22

这次试验获得的海冰的 K_{IC} 值与国外测试值基本上相一致, 比淡水冰 K_{IC} 值小^[3]。

下面对试验结果进行分析讨论。

1. 试样尺寸要求

为了满足平面应变条件, 以希望得到可靠、稳定的 K_{IC} , 裂纹长度 (a) 和韧带宽度 ($W-a$) 尺寸要求是 $a \geq 2.5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_y} \right)^2$, $W-a \geq 2.5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_y} \right)^2$ 。

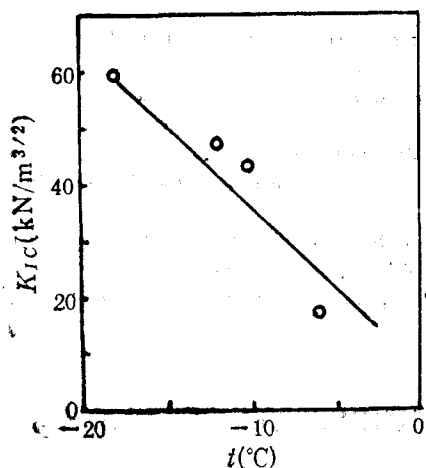
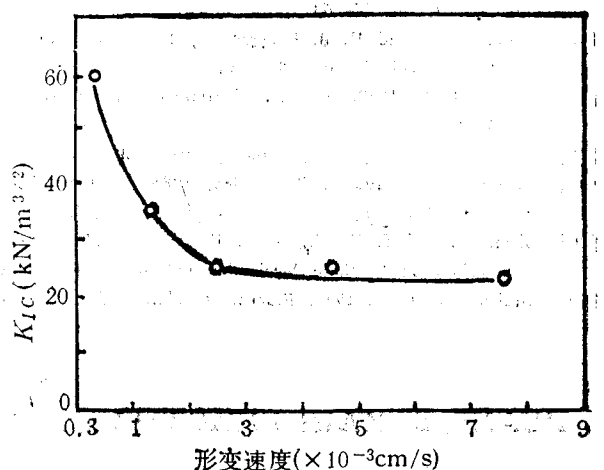
试样的厚度 (B) 是满足平面应变条件之一。试样裂纹尖端的应力强度因子 K 达到临界值 C 时, 则裂纹失稳扩展。对于 I 型裂纹来说, K_c 的大小与 B 有关。在保持其它尺寸不变的条件下, K_c 与 B 的关系是试样厚度增加, K_c 逐渐减小, 最后趋于恒定的最小值 K_{IC} 。该试验取了三种 B 值, 分别为 5cm, 10cm; 14.5cm; 对应的 K_{IC} 值分别为 $58\text{kN/m}^{3/2}$, $28\text{kN/m}^{3/2}$, $23\text{kN/m}^{3/2}$ 。试验证明 $B = 10\text{cm}$ 时, K_{IC} 较稳定, 这时测得的值满足 K_{IC} 的要求。关于 a 和 $(W-a) \geq 2.5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_y} \right)^2$ 的尺寸要求, 目前对其必要性和适用范围还存在着一些分歧, 有的认为过分, 有的则认为还不足。

2. 海冰 K_{IC} 与温度的关系

资料表明, 海冰的 K_{IC} 与海冰温度有着一定的关系。在一定的范围内, 海冰温度愈低, 则 K_{IC} 愈大, 这种关系与海冰的抗压强度和温度之间的关系相似 (见图 3)。当温度低到一定程度时, 此关系就不再成立了; 温度再降低时, 强度反而减小^[3]。从个别数据可知, 有的不完全符合这种情况, 我们认为这是冰样本身的差别造成的。

3. K_{IC} 与加载速度的关系

资料表明, 加载速度越慢, 海冰的 K_{IC} 值越高 (见图 4)。但也有例外, 这与上面所说的温度情况相类似。

图3 海冰 K_{IC} 与温度 (t) 的关系Fig. 3 Relation between K_{IC} and sea ice temperature (t)F₈₇₋₂ 号冰; 加载速度为 2.4×10^{-3} cm/s;
 $S = 3\%$; ○ 为一定温度下的 K_{IC} 值。图4 K_{IC} 与加载速度的关系Fig. 4 Relation between K_{IC} and load speedF₈₇₋₂ 号冰; $t = -18^\circ\text{C}$; $S = 3\%$;
○ 为一定温度下的 K_{IC} 值。

4. K_{IC} 与冰晶颗粒大小的关系

从试验中还可以发现, 结构不同的冰, K_{IC} 在相同的条件下, 呈现的值颇不相同。一般温度、加载速度都相同, 冰晶颗粒较大者, 呈现的断裂韧度值较大。F₈₇₋₁ 是颗粒状冰, 粒径为 3mm, F₈₇₋₃, F₈₇₋₂ 为柱状冰, 粒径为 5mm, 故 F₈₇₋₂, F₈₇₋₃ 比 F₈₇₋₁ 测得的值大。

5. 裂纹平面取向问题

与材料的各向异性有关的断裂韧度通常与裂纹的取向和传播方向有关, 而材料的各向异性又与机械加工或晶粒变动的方向有关。本试验试样的切口方向是垂直于海平面的方向, 与冰晶成长的方向相平行。这种切口冰容易断裂, 使之测得的值偏小一些。如果切口垂直于冰晶生长方向, 测得的值会略大一点。海冰是异向结构体, 应当同时对垂直方向的值进行测定, 试验结果才会全面客观, 但因为冰厚仅有 40cm 试样不够长, 所以只测了前一种情况。

三、结 论

1. 本试验获得的平面应变断裂韧度 K_{IC} 范围是 11—77 kN/m^{3/2}, 平均值为 32 kN/m^{3/2}。
2. K_{IC} 在一定的范围内, 随温度降低而增大。
3. K_{IC} 随加载速度减小而增大。

参 考 文 献

- [1] 陈饒等, 1977. 工程断裂力学(上册). 国防工业出版社, 290—296 页。
- [2] ASTM, 1981. Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials. Annual Book of ASTM Standards E 399-81. pp. 592—622.
- [3] Gold, L. W., 1963. Crack Formation in ice plates by thermal shock. *Can. J. Physics* 41: 1712—1728.
- [4] Griffith, A. A., 1924. Theory of Rapture. Proc. of the First International Congress for Applied Mecha-

- nics, Delft, pp. 55—63.
- [5] Hamaza, H. and D. B. Muggeridge, 1979. Plane strain fracture toughness (K_{Ic}) of fresh water ice. *POAC* 79, Vol. 1, pp. 697—707.
- [6] Irwin, G. R., 1957. Analysis of stresses and strains near the end of a crack transversing a plate. *J. Appl. Mech.* 24(3): 361—364.
- [7] Oroman, E., 1950. Fatigue and Fracture of Metals. *Proc. Mit. Symp.*, p. 139.
- [8] Parsons, B. L. and J. B. Snellen, 1985. Fracture Toughness of Fresh Water Prototype Ice and Carbamide Model Ice. *POAC* 85, Vol. 1, pp. 128—137.
- [9] Shen, W. and S. Z. Lin, 1986. Fracture Toughness of Bohai Bay Sea Ice, *Proc. of 5th International Symposium on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. Vol. IV, pp. 354—357.
- [10] Urabe, N., et al., 1980. Fracture toughness of sea ice Cold Regions. *Sci. Technol.* 3: pp. 29—37.

PLANE STRAIN FRACTURE TOUGHNESS K_{Ic} OF SEA ICE

Zhang Mingyuan, Meng Guanglin, Yan Dajiang and Yu Yonghai

(Institute of Marine Environmental Protection, SOA, Dalian)

ABSTRACT

In this paper, a test item in small scale is discussed. The major content of test is the fracture toughness of sea ice at outdoors.

American E₃₉₉₋₈₁ standard test method adopted to test the 3-point curved beam test for 3 kinds of ice samples totalling 130 were made at 5 different temperatures and 6 loading speeds. The range of plane strain fracture toughness of sea ice K_{Ic} of 11—77 kN/m^{3/2}, averaging 32 kN/m^{3/2} was obtained which agrees with that obtained by others. The value is less than that of the fresh water ice K_{Ic} .

Obtained also from the test is a close relation between fracture toughness of sea ice and the loading speed during testing, the test temperature of sea ice and ice crystalline particles. These factors rather greatly affect the critical value of stress strength factor K_{Ic} . To certain limit, the K_{Ic} value indicates that, when the loading speed increases, the fracture toughness K_{Ic} decreases and when the speed becomes slow, the K_{Ic} value becomes great. To certain temperature limit, the lower of sea ice temperature, the greater the fracture toughness of sea ice. This relation is similar to the relation between sea ice compressive strength and temperature. The problem regarding the size effect of sea ice fracture sample and the relation between K_{Ic} and the size of ice crystalline particles is also discussed. In general, if the particle is rather great, the fracture toughness presented is also rather great. As the sea ice is of anisotropic structure, the test sample used for this test is that whose direction of vertical sea level is in parallel with the direction of the growing up of ice crystal.