

# 辽东湾海冰单轴压缩长期强度的初步分析

李志军 孟广琳 隋吉学

(国家海洋局海洋环境保护研究所, 大连)

## 摘 要

冰的蠕变特性是其自身独特的一种性质,正是由于这一特性才导致了其本构关系的复杂性。室内确定海冰静压力强度特征的标准方法有:恒变形速率或加载速率下的压缩强度试验和恒荷载下的压缩蠕变试验。本文是根据近年来进行的海冰圆柱状试样单轴压缩强度和单轴压缩蠕变试验的结果,分析海冰的长期强度特征并给出统计结果。分析结果还表明海冰的弹性范围很小,即便是单轴压缩强度试验,也只有在加载时间很短的情况下,才表现出拟弹性阶段。

海冰属于多相复合材料,所以因冰类型、试验方法和分析方法的不同,试验结果也不尽相同,从而对结果的解释也不同。由于海冰的蠕变特性,使冰在与结构物长期相互抵触下,其强度会降低。因此,冰的长期强度特征是冰工程研究设计者关心的热点之一。它的研究结果在工程拓图设计阶段之后,就突出地表现出来。与地处北极地区的其他国家相比,我国海冰防害工作正逐步进入工程角色,冰的长期强度特征缺少详细探讨。本文是依据1985—1986年所进行的大量海冰圆柱状试样单轴压缩强度和单轴压缩蠕变试验结果,初步分析了辽东湾海冰的长期强度特征。

## 一、试验试样的制备和方法

海冰单轴压缩强度和单轴压缩蠕变试验试样均取自辽东湾东岸鲅鱼圈港内的同一平整固定冰层。该冰单层厚度为33 cm,平均盐度为3.600,平均密度为 $861 \text{ kg/m}^3$ 。从冰层中取出冰坯并加工成直径为7.0 cm,高为17.5 cm的圆柱状试样。全部试样均为柱状冰,平均粒径为9 mm。试样依据圆柱的柱轴与柱状冰长轴的垂直和平行关系分为两种,分别记作A组和B组。

单轴压缩强度试验所用的设备是海冰压力试验机,它的工作特点满足恒变形速率的条件。本项试验可以获取不同试验温度条件下A、B两组试样的单轴压缩强度与不同外力作用时间的关系。所以在5个试验温度下,对A组选用的220个试样和对B组选用的230个试样进行了试验。

单轴压缩蠕变试验设备采用了冰雪恒载蠕变试验机,其工作特点是冰样受外荷载不变,

记录试样变形随时间的变化过程。由于温度对蠕变过程影响明显,加之外荷载作用时间长,因此试验时要求试样精确并严格控制试验温度。试验前,首先对圆柱状试样进行再加工,使试样的直径在轴线上相等并且侧面与端面保持垂直。试验所采用的荷载范围是同种试样在同一温度下最大压缩强度的0.1—0.6倍。通过试验能够获取A、B两组试样在不同外载下随作用时间的变化过程,得到海冰长期强度。A组试样共22个,试验历时从6.4到19140 min。B组试样共15个,试验历时从17.4到2253 min。

## 二、单轴压缩条件下的海冰强度特征

就广义而言,材料的强度是材料抵抗破坏并保存残余变形的能力,而狭义上则指抵抗破坏的能力。它的定量指标就是出现破坏时的应力或者出现一定塑性变形之后的应力。对于脆性材料,事实上只具有前一种情况,而对塑性材料则两者均具有。据此,海冰依据温度、外力作用时间以及加载方向等,上述二种情况均能出现。

在海冰单轴压缩强度试验中,试样呈现的破坏方式因温度、加载速率或应变速率而异。一般分为韧性破坏(鼓胀型)和脆性破坏(剪切型)<sup>[1]</sup>。因此,根据试验温度和加载速率,海冰的破坏特征即可表现为粘塑、粘弹性质,也可表现出刚塑性质,图1表示A组试样在-5℃下的应力-应变曲线。由图1可见,在同一试验温度下,冰的性质表现为:(1)如果加载速率小,则外力作用时间长,冰表现为粘塑性质,压缩强度小(曲线c);(2)如果加载速率大,外力作用时间短,冰表现为刚塑性质,压缩强度偏低(曲线a);(3)介于两者之间加载速率下的破坏特征以弹塑性为主,压缩强度则高(曲线b)。各试验条件下,每一试样在应力-应变曲线中均出现一个峰值,所对应的强度叫峰值强度。

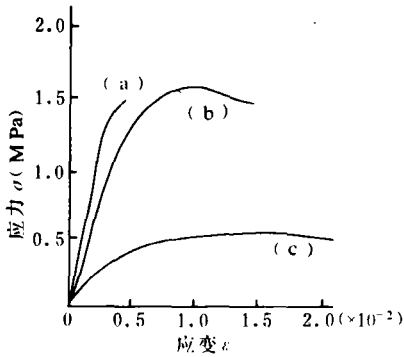


图 1 A组试样在-5℃下单轴压缩试验的应力-应变曲线

各破坏时间为: a —— 1s, b —— 12s, c —— 304s

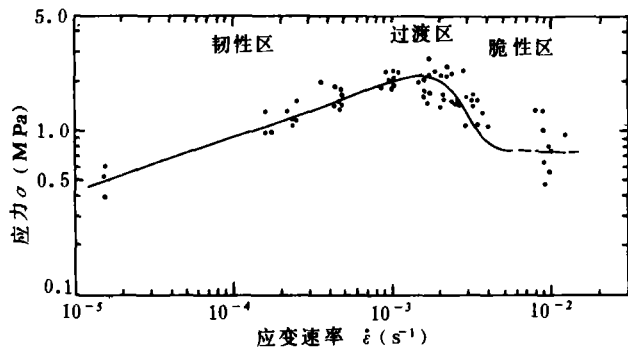


图 2 A组试样在-5℃下单轴压缩试验的应力-应变速率双对数曲线

把同一温度下的同组试样的各个峰值强度值描绘成应力-应变速率双对数曲线,也可相应发现试样的破坏方式,如图2所示。在韧性区内,冰的强度值随着应变速率增加而增加;在脆性区内,强度值降低且较分散;而在过渡区中强度值最大。在试验温度范围内

( $-5 \sim -25^\circ\text{C}$ ), 过渡区的应变速率范围分别是  $4 \times 10^{-4} \sim 2.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  (A组) 和  $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1} \sim 3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  (B组). 通过曲线拟合, 把过渡区中曲线的最大值定义为海冰在该温度下的最大压缩强度.

对于同一温度下的某种试样, 强度值随外力作用时间的关系可以根据单轴压缩强度试验得到的每一试样峰值强度与相应破坏时间的关系来获得. 这种关系实际上是不同应变速率下, 冰样峰值强度的包络线. 与应力-应变速率曲线相似, 该曲线也由低强度的脆性破坏达到出现最大强度的弹塑性破坏, 然后强度值随作用时间增加而减小, 最后接近一稳定值, 即海冰长期强度. 由于单轴压缩强度试验的外力作用时间不能持续很长, 所以需要单轴压缩蠕变试验结果来补充. 完整的海冰强度-时间过程包含了单轴压缩强度试验确定的短时间强度变化和单轴压缩蠕变试验确定的长时间强度变化.

### 三、海冰的长期强度特征

海冰与结构物接触时, 作用于结构物上的静压力就随时间呈负指数关系衰减, 最后趋于一个较稳定的值. 辽东湾海冰与结构物可能接触的时间决定于作用在冰层上的潮流和风, 而周而复始的潮流基本上就决定了冰层背离或接触结构物的时间. 因此, 辽东湾海冰长期强度不予考虑更长的时间, 但蠕变试验的历时除考虑这一主要因素之外, 还要兼顾试验结果的完整性.

图 3 是 A、B 两组试样在  $-5^\circ\text{C}$  温度下单轴压缩强度试验的强度与时间过程线. 从曲线上也可以确定冰样的最大压缩强度 ( $\sigma_{\max}$ )

和短时间内强度向长期强度变化的趋势. 这个最大值就作为长期强度曲线的起始值, 它包含了在应力-应变速率统计曲线中删除的因冰样结构差异造成的最大值. 此外, 海冰的压缩破坏强度随外力作用时间的关系曲线还表明: 在极短的破坏时间内, 强度值表现出较大的分散性, 在强度  $\sigma$  轴上有一定截距, 呈脆性破坏特征; 当试样破坏时间小于该最大压缩强度对应的破坏时间时, 则为弹塑破坏特征, 压缩强度随外力作用时间增加而增加, 呈线性关系达到最大压缩强度值; 当大于最大压缩强度对应的破坏时间, 海冰破坏进入粘塑性特征, 强度值随时间衰减; 作用时间更长时, 峰值强度则趋于冰的长期强度 ( $\sigma_r$ ). 该过程符合长期强度的经验统计关系式:

$$\sigma_r = at^{-\lambda} \quad (\text{MPa}),$$

式中,  $t$  为时间, 单位为  $\text{s}$ ;  $a$  和  $\lambda$  分别为海冰长期强度的试验参数, 它们均是冰温的函数. 根据各组试验结果的统计分析, 得到 A、B 两组试样在不同温度下的  $a$ 、 $\lambda$  值, 列入表 1. 另外, 图 4 给出其中 A 组试样在 5 个不同温度下的长期强度变化趋势拟合曲线.

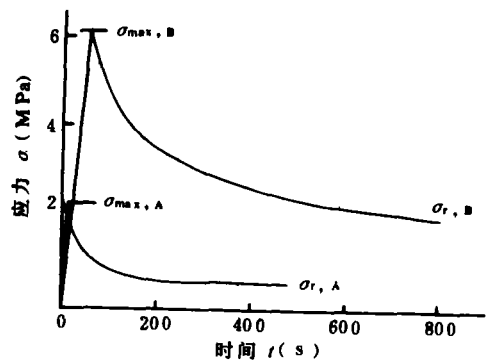


图 3 A、B 两组试样在  $-5^\circ\text{C}$  下单轴压缩强度试验的强度-时间过程线

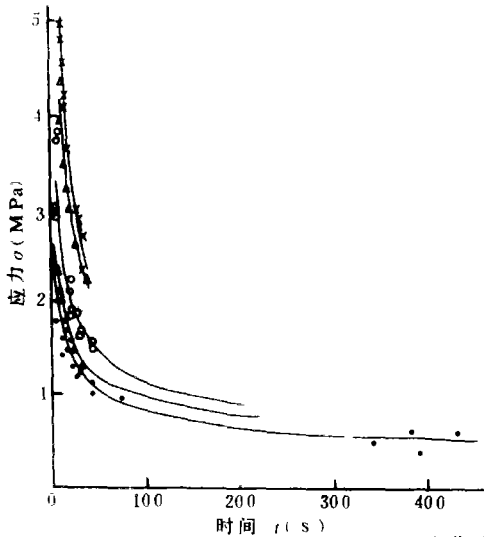


图 4 A 组试样单轴压缩试验的长期强度曲线

柱状冰的长轴，其峰值强度高，弹性区域大。加载时间小于 1 s，表现出刚性材料特征。在 1—50 s 之间，为拟弹性。大于 50 s 之后，冰强度随时间衰减，衰减速率比 A 组试样快。另外，B 组试样的最大压缩强度约是 A 组试样的 2.6—2.8 倍。

对长时间内冰强度与外力作用时间的关系可用蠕变试验的外作用荷载与蠕变破坏时间绘制的长期强度曲线来表征。对辽东湾海冰而言，在长时间里只发生恒定流速的变形而不出现破坏的情况，冰的长期强度就失去意义，只能取非衰减蠕变试验结果来描绘强度-时间关系曲线，该曲线仍可采用

$$\sigma_t = \alpha t^{-\lambda} \quad (\text{MPa})$$

式中， $t$  为时间，单位为 min； $\alpha$  和  $\lambda$  分别为海冰长期强度的蠕变试验参数，它们分别为：

$$\alpha_A = \frac{0.968}{\sigma_{\max, A}}, \quad \lambda_A = 0.170,$$

$$\alpha_B = \frac{4.679}{\sigma_{\max, B}}, \quad \lambda_B = 0.269,$$

其中， $\sigma_{\max, A}$  和  $\sigma_{\max, B}$  就是由单轴压缩强度试验确定的 A、B 两组冰样的最大压缩强度<sup>[2]</sup>：

$$\sigma_{\max, A} = 1.348 - 0.107 \theta_i, \quad (\text{MPa})$$

$$\sigma_{\max, B} = 3.991 - 0.226 \theta_i, \quad (\text{MPa})$$

式中， $\theta_i$  是冰的温度 (°C)。

图 5 给出两组蠕变试验长期强度在双对数坐标上的统计关系曲线。

冰的蠕变破坏特征仍然与加载方向有关。A 组试样主要表现为剪切破坏，而 B 组试样主要表现为沿晶粒结合面之间的破裂。两组试样的蠕变过程还与盐分排泄有关<sup>[3]</sup>

表 1 A、B 两组试样单轴压缩试验的长期强度参数

温度	A 组		B 组	
	$\alpha$	$\lambda$	$\alpha$	$\lambda$
-5	3 346.23	0.306	28 017.77	0.396
-10	4 084.56	0.313	32 972.92	0.379
-15	5 768.04	0.357	55 976.34	0.503
-20	12 280.14	0.470		
-25	15 894.37	0.523	53 903.76	0.394

由于 A 组试样的加载方向垂直于柱状冰的长轴，所以其峰值强度低，弹性范围小，脆性不明显。对 -5 °C 下的试验，仅在加载后 4 s，

就进入粘塑性质。B 组试样的加载方向平行于

柱状冰的长轴，其峰值强度高，弹性区域大。加载时间小于 1 s，表现出刚性材料特征。

在 1—50 s 之间，为拟弹性。大于 50 s 之后，冰强度随时间衰减，衰减速率比 A 组试样快。

另外，B 组试样的最大压缩强度约是 A 组试样的 2.6—2.8 倍。

对长时间内冰强度与外力作用时间的关系可用蠕变试验的外作用荷载与蠕变破坏时间绘制的长期强度曲线来表征。对辽东湾海冰而言，在长时间里只发生恒定流速的变形而不出现破坏的情况，冰的长期强度就失去意义，只能取非衰减蠕变试验结果来描绘强度-时间关系曲线，该曲线仍可采用

$$\sigma_t = \alpha t^{-\lambda} \quad (\text{MPa})$$

式中， $t$  为时间，单位为 min； $\alpha$  和  $\lambda$  分别为海冰长期强度的蠕变试验参数，它们分别为：

$$\alpha_A = \frac{0.968}{\sigma_{\max, A}}, \quad \lambda_A = 0.170,$$

$$\alpha_B = \frac{4.679}{\sigma_{\max, B}}, \quad \lambda_B = 0.269,$$

其中， $\sigma_{\max, A}$  和  $\sigma_{\max, B}$  就是由单轴压缩强度试验确定的 A、B 两组冰样的最大压缩强度<sup>[2]</sup>：

$$\sigma_{\max, A} = 1.348 - 0.107 \theta_i, \quad (\text{MPa})$$

$$\sigma_{\max, B} = 3.991 - 0.226 \theta_i, \quad (\text{MPa})$$

式中， $\theta_i$  是冰的温度 (°C)。

图 5 给出两组蠕变试验长期强度在双对数坐标上的统计关系曲线。

冰的蠕变破坏特征仍然与加载方向有关。A 组试样主要表现为剪切破坏，而 B 组试样主要表现为沿晶粒结合面之间的破裂。两组试样的蠕变过程还与盐分排泄有关<sup>[3]</sup>

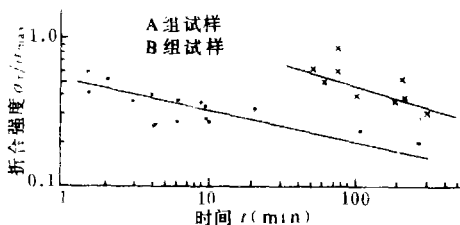


图 5 单轴压缩蠕变试验的长期强度在双对数坐标上的统计曲线

## 四、结 论

1. 对于同一温度下的某组试样,冰强度值的大小取决于外荷载作用历时.当作用时间很短时,表现为脆性破坏,而后,随作用时间增加,冰强度达到一最大值,紧接着冰强度开始随作用时间衰减,最后趋于冰的长期强度.

2. 海冰的长期强度特征由 $\sigma_r = at^{-\lambda}$ 表示,  $a$  和  $\lambda$  值的大小与冰温有关.

3. A 组试样破坏与 B 组相比表现为弹性范围小,脆性不明显. B 组试样的最大压缩强度约是 A 组试样的 2.6—2.8 倍.

## 参 考 文 献

- [1] 李福成等.应变率对海冰单轴抗压强度的影响,海洋学报, 8 (1986), 5: 619—625.
- [2] 孟广琳等.渤海平整冰单轴抗压强度的研究,冰川冻土, 9 (1987), 4: 329—338.
- [3] Li Zhijun *et al.*, Creep process and rupture characteristics of sea ice in the Bohai Sea, POAC 87, 1 (1987), 33—38.