

# 天然淡水冰单轴压缩强度及其温度和应变率效应<sup>1)</sup>

沈乐天 赵士达 卢锡年 史毓香 陈淑霞

(中国科学院力学研究所, 北京)

**提 要** 本文报道了在不同温度和不同应变率下天然淡水冰单轴压缩强度的实验结果。指出 S-1 型柱状晶粒冰的压缩强度随着温度的降低而增加, 极限压缩强度在应变率为  $10^{-4}\text{s}^{-1}$  时有一个最大值。本实验的应变率范围是  $10^{-5}$ — $10^0\text{s}^{-1}$ 。  $10^{-1}$ — $10^0\text{s}^{-1}$  的应变率范围是在冲击速度  $1\text{m/s}$  左右的实验条件下获得的, 这个速度接近于浮冰与海上结构物相撞的情况。以本实验为基础, 有希望发展对海冰的实验技术。

**关键词** 天然淡水冰 压缩强度 温度 应变率

冰的强度问题是冰冻地区桥梁、堤坝、港湾、海上钻井平台等结构物设计时必须考虑的重要因素。随着海洋航运与近海石油工程的发展, 这个问题越来越受到工程部门的广泛重视。在大多数情况下, 首要的问题是冰的极限压缩强度。但应该指出, 在设计某些水中结构物时, 不能只考虑静止的冰力对结构物的作用, 还必须注意到运动着的冰块对结构物的作用力。例如浮冰对海洋平台的作用及运行的破冰船对冰的作用。这就不但需要了解冰的强度和变形的关系, 还必须研究它的应变率效应。本工作测定了天然淡水冰在不同温度和不同应变率下的极限压缩强度。温度由  $268\text{K}$  变化到  $253\text{K}$ , 应变率变化范围从  $10^{-5}$ — $10^0\text{s}^{-1}$ 。实验中达到的最高撞击速度约为  $1\text{m/s}$ , 这个速度接近于浮冰与结构物相撞的工程情况。因此, 本文提供的试验方法和实验结果, 对于海冰试验和近海工程结构设计亦可作为参考。

## 1 试验方法和结果

采冰地点为北京圆明园的福海后海, 采冰日期是 1986 年 1 月 10 日下午, 当天气温为  $265$ — $274\text{K}$ , 冰层厚度为  $330\text{mm}$ 。冰层沿厚度方向分为上下两层, 底层冰致密无气泡, 密度为  $0.926\text{g/cm}^3$ ; (测量时的环境温度为  $268\text{K}$ ); 表层冰夹有大量气泡, 密度为  $0.905\text{g/cm}^3$ 。从冰的形成结构看, 是柱状晶粒冰。晶粒尺寸为  $\phi 15\text{mm}$ , 属于 S-1 型湖冰 (Michel 等, 1971)。

为了便于分析, 冰试样最后加工成直径为  $70\text{mm}$  (Schwarz 等, 1981), 长度为

<sup>1)</sup> 本文于 1988 年 3 月 9 日收到, 12 月 14 日改回。

表 1 试验结果

Table 1 Experimental results

试验号	试样高度 (mm)	撞击速度 (m/s)	横梁速度 (mm/min)	试样温度 (K)	平均应变率 (s <sup>-1</sup> )	极限压缩强度 (MPa)	破坏时间 (s)	破坏应变
8	96	0.87		253	$3.8 \times 10^{-1}$	5.04	$1.2 \times 10^{-3}$	$3.81 \times 10^{-4}$
10	98	0.86		253	$3.9 \times 10^{-1}$	3.42	$1.1 \times 10^{-3}$	$2.89 \times 10^{-4}$
12	94	0.97		263	$1.0 \times 10^0$	4.04	$0.61 \times 10^{-3}$	$4.90 \times 10^{-4}$
13	87	1.88		263	$5.9 \times 10^{-1}$	2.61	$0.45 \times 10^{-3}$	$2.30 \times 10^{-4}$
18	82	1.03		263	$1.9 \times 10^{-1}$	2.49	$0.58 \times 10^{-3}$	$1.01 \times 10^{-4}$
22	97	1.64		268	$7.4 \times 10^{-1}$	3.23	$0.59 \times 10^{-3}$	$4.12 \times 10^{-4}$
27	94	1.19		268	$4.7 \times 10^{-1}$	3.48	$1.20 \times 10^{-3}$	$5.38 \times 10^{-4}$
29	94	0.39		268	$8.6 \times 10^{-2}$	0.56	$1.47 \times 10^{-3}$	$1.26 \times 10^{-4}$
53	94		50	253	$8.9 \times 10^{-3}$	9.42	0.84	$7.45 \times 10^{-3}$
54	96		50	253	$8.7 \times 10^{-3}$	7.00	0.84	$7.29 \times 10^{-3}$
61	71		50	253	$1.2 \times 10^{-2}$	8.65	0.78	$9.15 \times 10^{-3}$
52	90		5	253	$9.3 \times 10^{-4}$	8.21	9.36	$8.67 \times 10^{-3}$
67	95.2		5	253	$8.8 \times 10^{-4}$	10.44	13.8	$1.21 \times 10^{-2}$
69	95.5		5	253	$8.8 \times 10^{-4}$	7.93	13.4	$1.17 \times 10^{-2}$
62	98		0.5	253	$8.6 \times 10^{-5}$	11.77	169.5	$1.44 \times 10^{-2}$
64	96.5		0.5	253	$8.7 \times 10^{-5}$	10.31	150.0	$1.30 \times 10^{-2}$
65	97.2		0.5	253	$8.6 \times 10^{-5}$	9.25	139.2	$1.19 \times 10^{-2}$
56	91		0.05	253	$0.9 \times 10^{-5}$	7.41	1.180	$1.09 \times 10^{-2}$
57	84		0.05	253	$1.0 \times 10^{-5}$	-7.57	1.128	$1.12 \times 10^{-2}$
58	93		0.05	253	$0.9 \times 10^{-5}$	-7.66	1.212	$1.09 \times 10^{-2}$
76	87		5	263	$9.6 \times 10^{-4}$	-8.34	10.5	$1.01 \times 10^{-2}$
75	93		5	263	$9.0 \times 10^{-4}$	7.00	10.3	$9.25 \times 10^{-3}$
74	95		5	263	$8.8 \times 10^{-4}$	9.16	10.8	$9.47 \times 10^{-3}$
71	90		0.5	263	$9.3 \times 10^{-5}$	7.00	121.2	$1.12 \times 10^{-2}$
70	91		0.5	263	$9.2 \times 10^{-5}$	5.92	115.2	$1.06 \times 10^{-2}$
73	97		0.5	263	$8.6 \times 10^{-5}$	6.55	130.8	$1.12 \times 10^{-2}$
85	98		5	268	$8.5 \times 10^{-4}$	7.83	9.84	$8.37 \times 10^{-3}$
83	97		5	268	$8.6 \times 10^{-4}$	5.85	8.76	$7.53 \times 10^{-3}$
81	97		0.5	268	$8.6 \times 10^{-5}$	6.17	108	$9.28 \times 10^{-3}$
80	97		0.5	268	$8.6 \times 10^{-5}$	5.13	109.2	$9.38 \times 10^{-3}$

90 mm 的圆柱形。试样的加工过程如下:把从现场取来的大块冰,在带锯上切成  $80 \times 80 \times 120$  mm 的长方体,然后用特制的管形刀具在钻床上套钻成直径为 70 mm 的圆柱形。两端面经手工仔细刨削,最后在平台上研磨平。准备好的试样密封装入塑料袋,置于深冷冰箱(243 K)内储存。冰试样的取样方向是使冰层厚度方向垂直于圆柱面,从而使加载方向垂直于柱状晶粒的长轴。本实验的冰试样均取质量好的底层冰,但对夹有大量气泡的表层冰也作了比较试验,发现两者的极限压缩强度并无明显差别。

试验分别在 Instron 1195 万能试验机(应变率在  $10^{-5}—10^{-2} \text{s}^{-1}$ )以及一台自行设计和制造的动态压缩强度试验机(应变率在  $10^{-1}—10^0 \text{s}^{-1}$ )上完成。实验在 253 K、263 K 和 268 K 三个温度下进行。在使用 Instron 机的试验中,由横梁速度和试样高度得到试样平均应变率。在撞击试验中,是由应变片记录计算得到试样平均应变率。撞击试验机实际上是一个气动锤,撞击速度范围是 0.4—2 m/s,锤头直径为 100 mm,最大载荷为 70 000 N。

试验前,冰试样先在深冷冰箱中,于所要求的实验温度下保温 12 小时,然后置入 Instron 试验机的低温箱中进行低应变率( $10^{-5}—10^{-2} \text{s}^{-1}$ )单轴压缩试验。在整个试验过程中,低温箱保持在试验温度,温度控制精度为  $\pm 1 \text{K}$ 。机器自动记录等横梁速度下的时间—载荷曲线。因此,应力—名义应变率关系和应力—实际应变率关系就能够得到。由于动态压缩强度试验机与保存冰试样的深冷冰箱置在同一实验室中,室温在 268 K 左右,且动态试验时间较短(一般在几秒之内完成),因此在进行高应变率( $10^{-1}—10^0 \text{s}^{-1}$ )的撞击试验时,冰试样是直接从冰箱中取出,而没有使用低温箱。撞击试验中,应力和应变分别由载荷传感器和贴在试样相对侧面上的一对应变片来测定,测量结果用一台 TCG-8 000 双线瞬态波形存贮仪记录。应变片的标距为 8 mm,阻值为 120  $\Omega$ 。应变片是使用冰冻法贴到试样上的。使用一对应变片的目的是为了改善由于试样受力不均匀引起的弯曲所带进的应变测量误差。本实验研究了冰试样在不同温度和不同应变率下的应力—应变关系。表 1 列出了试验结果。

## 2 讨 论

### 2.1 应变率影响

从表 1 试验结果见到,应变率从  $10^{-1} \text{s}^{-1}$  增加到  $10^{-4} \text{s}^{-1}$ ,冰试样的极限压缩强度和破坏应变均是增加的。但随着应变率的继续增加,极限压缩强度和破坏应变将下降。图 1 表示了冰试样在 253 K 时,其极限压缩强度与应变率的关系。极限压缩强度在应变率为  $10^{-4}$  时有一个最大值。这与 Sinha(1981)和沈悟等(1984)的结论一致。但在我们的实验中没有见到冰的极限压缩强度由最高点突然跌落的现象。Sinha(1981)认为这种冰的强度骤然下降,实际是与试验方法存在问题(如试样准备不仔细或试验设备使用不当)有关,并非冰的本性。

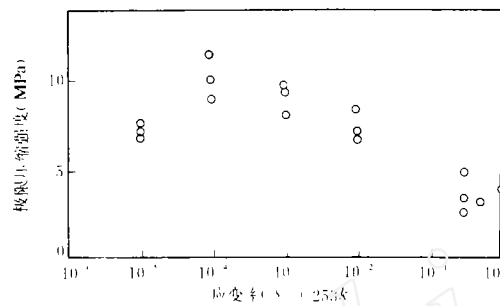


图1 冰的极限压缩强度与应变率的关系

Fig.1 The relation between peak strength of ice and strain rate

## 2.2 温度影响

从表 1 也可见到, 试验温度越低, 冰的极限压缩强度越高(Hobbs, 1974; Mellor, 1979)。在相同应变率下, 试验温度降低, 冰的破坏应变增大。表 2 列出了平均应变率为  $10^{-4}\text{s}^{-1}$  时, 在不同试验温度下, 冰的极限压缩强度的平均值。从表 2 的数据看, 冰的极限压缩强度  $\sigma_f$  (MPa) 与温度  $T$  (K) 存在下述线性关系:

$$\sigma_f = 72.86 - 0.2467T$$

这与 Козицкий 的结果相当一致(Богородский, 1980)。

表 2 平均应变率  $10^{-4}\text{s}^{-1}$  时冰的极限压缩强度与温度的关系Table 2 The peak strength of ice vs temperature at the strain rate of  $10^{-4}\text{s}^{-1}$ 

试验温度 (K)	253	263	268
极限强度 (MPa)	10.44	7.97	6.74

## 2.3 冰试样的破坏过程

在加载过程中, 试样都是首先在两加载面之间产生自上至下的裂纹, 裂纹垂直于柱状晶粒的长轴方向, 最后整个试样被压垮。

## 2.4 应变测量误差

在高应变率试验中 ( $10^{-1}$ — $10^0\text{s}^{-1}$ ), 本工作是用应变片来测定试样的应变历史。由于所用应变片的标距较小, 当试样在加载过程中一旦发生断裂, 就有可能发生应变片过早脱落的情况, 引起应变测量的偏差。我们把载荷传感器的测量时间与应变片的测量时间作了比较, 发现其测量误差在 10% 以内。实验中, 有时候也出现载荷记录与应变记录之间有相位延迟。

## 2.5 冰试样的尺寸

冰的压缩强度可能与试样尺寸和晶粒尺寸之比有关。为了消除这个影响,一般希望试样的宽度能 15—20 倍于晶粒直径,这样试样就非常小。Schwarz 建议用直径(或宽度)为 7.5 cm 到 10 cm 的圆柱形或方形的标准试样做实验,然后与参考曲线比较,对实验结果进行修正。而参考曲线是由独立的系统的研究来建立(Schwarz 等, 1981)。限于条件,这项工作我们尚未进行。

致谢: 作者感谢 N. K. Sinha 教授对本文提出的宝贵的评注和建议,感谢李天佑、谢长春、孙宁和绳刚在实验工作中给予的合作。

## 参 考 文 献

- 沈悟、林树枝 (1984): 渤海东部一年冰单轴压缩强度的应变率敏感性. 大连工学院学报, 23 (4): 45—49.
- Hobbs P.V.(1974): Ice physics. Oxford University press.
- Mellor M.(1979): Mechanical properties of polycrystalline ice. IUTAM Symposium on Physics and Mechanics of Ice. 217—245.
- Michel B.and Ramseier R. O. (1971): Classification of river and lake ice. Canadian Geotechnical journal, 36 :36—45.
- Schwarz J.et al.(1981): Standardized testing methods for measuring mechanical properties of ice. Cold Regions Science and Technology, 4: 245—253.
- Sinha N.K. (1981): Rate Sensitivity of compressive strength of columnar-grained ice. Experimental mechanics, (216): 210—218.
- Богородский В.В.,Гаврило В.П. (1980): Лед, физические свойства современные методы гляциологии. Ленинград, Гидрометеозда т:145.

## Effects of Temperature and Strain Rate on Uniaxial Compressive Strength of Natural Fresh Water Ice

Shen Letian , Zhao Shida , Lu Xinian , Shi Yuxiang and Chen Shuxia  
(*Institute of Mechanics , Academia Sinica , Beijing*)

### Abstract

Experimental results of compressive strength of natural fresh water ice at different temperatures and strain rates are reported in this paper , it is shown that compressive strength of columnar-grained S-1 type ice with loads applied perpendicular to the length of the columns increases with decreasing temperature .the range of average actual strain rate covers from  $10^{-5}$  to  $10^3 \text{ s}^{-1}$  .the strain rate of  $10^{-1}$ – $10^0 \text{ s}^{-1}$  in these experiments are obtained with the impact velocity of m / s or so which is close th the impacting velocity of sea ice on marine structures. based on thdis study itis hopeful to develop the experimental tdechnique for sea ice .

**Key words** :natural fresh water ice .compressive strength ,temperature ,strain rate