

# 细粒酒精模型冰的弯曲强度试验研究\*

李志军

(国家海洋环境监测中心; 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室 大连 116024)

RISKA Kaj

(赫尔辛基理工大学北极近海研究中心 芬兰爱斯堡 02150)

**提要** 基于不同制冰条件和厚度的细粒酒精模型冰层原位悬臂梁弯曲强度试验, 给出细粒酒精模型冰弯曲强度; 分析了考虑和不考虑浮力效应对弯曲强度的差异; 利用向上和向下弯曲强度结果给出该模型冰各向同性的证据; 得到该冰弯曲强度与其密度、冰内未冻液含量和制冰过程可控制因子(冰池室内温度、升降温时间、冰厚)的关系, 并作为定量控制模型冰质量的基础。

**关键词** 细粒酒精模型冰 弯曲强度 试验研究

**学科分类号** P731.15

冰与近海结构物相互作用的物理模拟研究自60年代起受到重视。模型冰的类型也随之崛起。目前模型冰基本有三类, 非冻结合成冰、冻结粒状冰、冻结柱状冰。赫尔辛基理工大学北极近海研究中心(AORC)的细粒酒精模型冰属于冻结粒状冰, 从1989年问世以来, 也列入国际模型冰行列。天津大学引用的尿素冰属于冻结柱状冰, 两者结构差异由制冰工艺造成(史庆增等, 1991)。细粒酒精模型冰的基本性能曾做过初步研究(Jalonon *et al.*, 1990)。Li Zhijun等(1996)不仅对该模型冰物理力学性质进行了系统研究, 重要的是获得利用制冰时冰池气温、制冰各阶段时间与冰厚评价模型冰物理力学性质的定量关系, 特别发现溶液的冰点温度对冰结构影响; 得到这种影响是添加剂引起冰结构显著变化的体现。由于研究的设计目标是寻求该模型冰物理力学性质同制冰条件的关系, 所以没有从化学分子效应出发, 而是利用溶液的冰点温度体现溶液的浓度效应。AORC冰池长40m, 宽40m, 水深2.8m, 只要浓度提高一点, 即意味着加入数吨酒精。研究中仅使用两种浓度, 对应的冰点温度分别为 $-0.13^{\circ}\text{C}$ 和 $-0.21^{\circ}\text{C}$ 。实测发现模型冰温度与溶液冰点温度相同, 模型冰通过冰内未冻液体含量和结构来实现模拟天然冰的力学性质, 与冰温无关。本文介绍该冰弯曲强度特性和与物理指标、制冰条件的关系。

## 1 试验方法

细粒酒精模型冰由均匀沉降在冰池液体表面的细小冰粒组成, 从结构上基本属于均

\* 国家海洋局青年海洋科学基金资助项目, 96-505号; 国家教委重点科技项目, 97-87号。李志军, 男, 出生于1960年, 博士, 研究员, E-mail: lizhijun@dlut.edu.cn

收稿日期: 1997-10-30, 收修改稿日期: 1998-02-10

质各向同性材料。模型冰弯曲强度采用悬臂梁法获得,冰悬臂梁的弯曲强度是:

$$\sigma_f = \frac{6PL}{Bh^2}$$

式中,  $P$  为冰悬臂梁破坏时的荷载;  $L$  为悬臂梁长度;  $h$  为冰厚;  $B$  为冰悬臂梁宽度。

在 AORC, 弯曲试验的悬臂梁直接在模型冰层上切割出梁的三个边, 第四边保留与冰层相连。由于没有使用割切冰样的模具, 各个悬臂梁的形状相似, 但尺寸无法保持一致。悬臂梁尺寸统一到  $L = (5-6)h$ ,  $B = 2h$ 。在悬臂梁的自由端加载, 直到悬臂梁在近根部破坏。整个过程中, 由压力传感器测量悬臂梁端部的作用力并由计算机以 234Hz 的频率采集记录。试验研究中, 每次切割加工 6 至 10 根悬臂梁, 3—5 根悬臂梁向下加载破坏(表层拉伸)和 3—5 根悬臂梁向上加载破坏(底层拉伸)。1995 年 3—5 月间试验时的试样尺寸、加载方向等归纳于表 1。

表1 弯曲强度试验汇总

Tab.1 Summary of flexural strength tests

| 日期<br>(月-日) | 加载<br>方向 | 试样<br>数(根) | 冰点<br>(°C) | 厚度<br>(mm) | 长厚<br>比 | 宽厚<br>比 | 荷载<br>(N) | 考虑浮力弯<br>曲强度 (kPa) | 不考虑浮力<br>弯曲强度 (kPa) |
|-------------|----------|------------|------------|------------|---------|---------|-----------|--------------------|---------------------|
| 03-21       | 向下       | 4          | -0.13      | 35.0       | 5.33    | 2.05    | 1.59      | 22.55              | 12.97               |
| 03-24       | 向下       | 4          | -0.13      | 22.0       | 8.92    | 3.08    | 2.15      | 77.94              | 54.86               |
| 04-05       | 向下       | 4          | -0.13      | 49.0       | 4.75    | 1.86    | 8.15      | 49.67              | 44.14               |
| 04-12       | 向下       | 4          | -0.13      | 30.0       | 6.43    | 2.38    | 6.16      | 106.23             | 99.82               |
| 04-21       | 向下       | 3          | -0.13      | 30.0       | 6.28    | 2.19    | 7.95      | 157.16             | 147.49              |
| 04-26       | 向下       | 4          | -0.13      | 62.0       | 3.83    | 1.59    | 16.32     | 61.07              | 58.40               |
| 04-26       | 向下       | 4          | -0.13      | 62.0       | 4.12    | 1.60    | 10.66     | 41.30              | 37.15               |
| 04-27       | 向下       | 4          | -0.13      | 61.0       | 4.15    | 1.64    | 6.01      | 24.56              | 21.18               |
| 05-23       | 向下       | 4          | -0.21      | 33.0       | 6.03    | 2.32    | 1.05      | 14.30              | 13.97               |
| 05-23       | 向下       | 5          | -0.21      | 33.0       | 6.22    | 2.31    | 0.85      | 12.79              | 12.51               |
| 05-30       | 向下       | 3          | -0.21      | 58.5       | 5.49    | 2.31    | 23.67     | 99.47              | 96.69               |
| 05-30       | 向下       | 4          | -0.21      | 59.0       | 4.54    | 1.80    | 16.16     | 69.65              | 70.12               |
| 05-31       | 向下       | 4          | -0.21      | 58.5       | 5.00    | 2.10    | 7.55      | 32.38              | 29.27               |
| 03-21       | 向上       | 3          | -0.13      | 35.0       | 5.76    | 2.13    | 2.44      | 32.31              | 22.49               |
| 03-24       | 向上       | 4          | -0.13      | 22.0       | 8.39    | 2.82    | 1.21      | 47.53              | 42.30               |
| 04-05       | 向上       | 4          | -0.13      | 49.0       | 4.69    | 1.98    | 8.72      | 50.53              | 45.78               |
| 04-12       | 向上       | 4          | -0.13      | 30.0       | 7.04    | 2.61    | 6.13      | 113.93             | 104.79              |
| 04-21       | 向上       | 4          | -0.13      | 30.0       | 6.40    | 2.21    | 5.87      | 105.04             | 97.07               |
| 04-26       | 向上       | 1          | -0.13      | 62.0       | 4.00    | 1.85    | 15.32     | 51.57              | 43.59               |
| 04-26       | 向上       | 1          | -0.13      | 62.0       | 3.95    | 1.53    | 13.01     | 52.35              | 44.30               |
| 04-27       | 向上       | 3          | -0.13      | 61.0       | 3.92    | 1.62    | 10.00     | 37.70              | 27.43               |
| 05-23       | 向上       | 3          | -0.21      | 33.0       | 6.24    | 2.37    | 0.87      | 12.71              | 12.18               |
| 05-23       | 向上       | 3          | -0.21      | 33.0       | 6.12    | 2.40    | 0.93      | 13.13              | 12.10               |
| 05-30       | 向上       | 2          | -0.21      | 58.5       | 5.19    | 2.11    | 14.62     | 122.92             | 112.92              |
| 05-30       | 向上       | 2          | -0.21      | 59.0       | 4.79    | 2.06    | 11.68     | 95.01              | 89.0                |
| 05-31       | 向上       | 3          | -0.21      | 58.5       | 5.00    | 1.97    | 9.32      | 41.49              | 38.70               |

## 2 试验结果分析

### 2.1 浮力效应

当细粒酒精模型冰悬臂梁自由端部承受下压荷载时,悬臂梁承受向上浮力,下压作用力会随时间迅速增加,然后在悬臂梁破坏时突然失去作用力。但上拉加载时,作用力起初会因同向浮力而缓慢增加,然后加快;在荷载历时曲线中有数个峰值,只有个别试验曲线峰值较少。悬臂梁下压破坏比上拉破坏的时间短。

作用在悬臂梁端部的真实荷载应该考虑浮力的影响。因此,最大荷载取荷载历时曲线上最大值与该点浮力之差。冰悬臂梁破坏时的浮力则根据悬臂梁在液体内的浮力反映过程估算。在冰与船舶或海洋结构物的实际相互作用中存在着浮力,并且在实际工程设计中,也不考虑浮力。从这一点看,使用不考虑浮力的弯曲强度( $\sigma_f$ -without buoyancy)似乎在分析冰与船舶或海洋结构物相互作用中可能更佳。如果单纯为了比较悬臂梁法与简支梁法的室内试验结果,则需要考虑浮力的弯曲强度( $\sigma_f$ -buoyancy)。比较表 1 的试验结果,得到当冰悬臂梁承受向下作用力破坏时,不考虑浮力的弯曲强度是考虑浮力的 1.03—1.56 倍,平均为 1.12 倍;当冰悬臂梁承受向上作用力破坏时,不考虑浮力的弯曲强度是考虑浮力的 1.06—1.43 倍,平均为 1.15 倍。

### 2.2 加载速率效应

虽然试验使用了几乎相同的压头位移速度,但由于加载方向不同,冰悬臂梁的破坏时间也不同,从而可以分析名义加载速率的弯曲强度效应。图 1 给出考虑浮力的弯曲强度随加载速率的变化,虽然数据显得比较分散,但向上或向下加载的弯曲强度均随着加载速率呈上升趋势。由于试验加载速率范围较小,未能发现类似黄河口附近海区低盐度海冰三点弯曲强度与应力速率的抛物线试验关系(隋吉学等,1996),即在某一加载速率下弯曲强度对应着一个最大值。

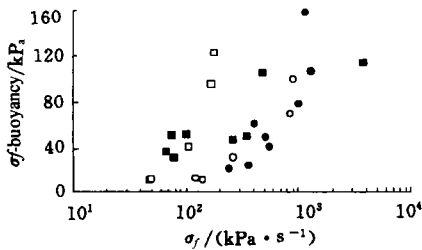


图 1 加载速率对考虑浮力悬臂梁弯曲强度的效应

Fig.1 Effect of loading rate on the flexural strengths with buoyancy

- 向下,冰点: -0.13℃; ○ 向下,冰点: -0.21℃;
- 向上,冰点: -0.13℃; □ 向上,冰点: -0.21℃

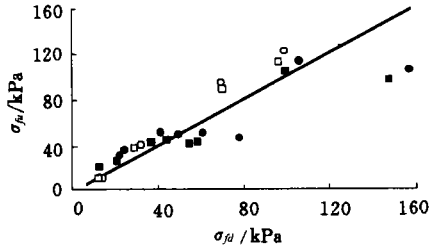


图 2 模型冰向上和向下加载弯曲强度间的关系

Fig.2 Flexural strengths in relation to model ice loaded upwards and downwards

- 考虑浮力,冰点: -0.13℃; ○ 考虑浮力,冰点: -0.21℃;
- 不考虑浮力,冰点: -0.13℃; □ 不考虑浮力,冰点: -0.21℃

从加载装置上看,加载时压头速度容易控制和调整,而控制破坏时间却相当困难。如果模型冰的破坏时间控制在 1—2s 之间(Hayward *et al*, 1993),它就与天然冰悬臂梁弯曲强度试验的要求一致。这时,相应的模型冰加载速率会更低,强度也会更低。事实上,这个

破坏时间也需要符合相似准则。如果尺寸比是 10—20, 对应天然冰破坏时间为 1—2s, 模型冰破坏时间应缩小到 0.22—0.63s。AORC 模型冰弯曲强度的破坏时间多数在这一范围。

### 2.3 加载方向效应

加载方向效应来自于冰表层或底层拉伸强度的差异。对天然冰而言, 由于冰层内存在的温度梯度和冰晶体结构的差异(隋吉学等, 1988), 向上弯曲强度( $\sigma_{fu}$ )和向下弯曲强度( $\sigma_{fd}$ )的差异是存在的。即使冰的晶体结构从表层至底层一致, 但因天然冰内的温度梯度存在, 表层和底层的拉伸强度仍不一致。对于 AORC 的模型冰层, 几乎没有温度和结构的差异。因此在不考虑浮力的情况下, 则没有差异存在。这一点可从图 2 所示的向上和向下加载弯曲强度间的关系看出, 以说明 AORC 模型冰的各向同性。

### 2.4 模型冰物理性质效应

细粒酒精模型冰物理力学性质的控制因子是冰内未冻液体含量。由于测量和评估冰内未冻液体的困难, 冰密度常用作间接指标(图 3, 4)。根据热能平衡的观点, 引入评价细

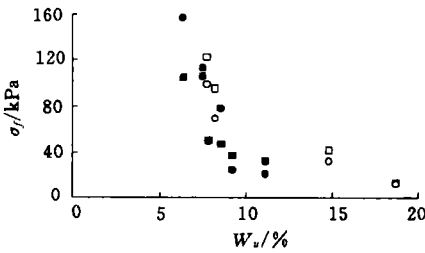


图 3 未冻液体含量对悬臂梁弯曲强度的效应

Fig.3 Flexural strengths in relation to the content of the unfrozen solution

- 向下, 冰点: -0.13℃; ○ 向下, 冰点: -0.21℃;
- 向上, 冰点: -0.13℃; □ 向上, 冰点: -0.21℃

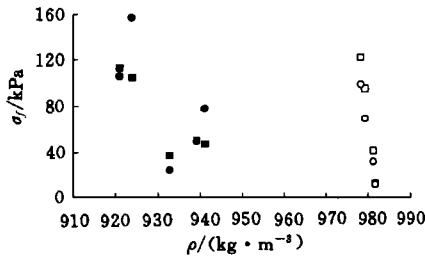


图 4 悬臂梁弯曲强度和密度的关系

Fig.4 Relationship between flexural strengths and density

- 向下, 冰点: -0.13℃; ○ 向下, 冰点: -0.21℃;
- 向上, 冰点: -0.13℃; □ 向上, 冰点: -0.21℃

粒酒精模型冰性能的新指标:  $\theta \cdot t / h^2$ 。该指标考虑了冰厚度、温度和固结、回温的时间, 这是利用制冰可控制因子来实现获取理想模型冰质量的基础(图 5)。由于未冻液体含量

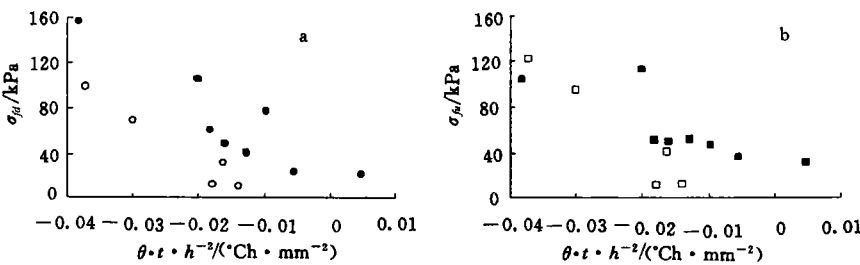


图 5 悬臂梁向下(a)和向上(b)弯曲强度与评价指标的关系

Fig.5 Downward(a) and upward (b) flexural strengths vs. the evaluation index

- 向下, 冰点: -0.13℃; ○ 向下, 冰点: -0.21℃; ■ 向上, 冰点: -0.13℃; □ 向上, 冰点: -0.21℃

越高,冰的内部联结力越小,所以弯曲强度随未冻液体含量的增加呈衰减趋势。溶液冰点温度差异造成的结构差异在弯曲强度与密度和评价指标中均有体现。

### 3 结论

3.1 模型冰悬臂梁试样的长度与厚度比和宽度与厚度比与天然冰的试验要求一致,即  $L = (5-6)h$ ,  $B = 2h$ 。

3.2 计算弯曲强度时,考虑浮力效应比不考虑浮力效应仅平均低 15%。远小于试验值的均方差,实践中意义不大。

3.3 模型冰弯曲强度和加载速率影响类似渤海天然冰。而加载破坏时间应遵守相似律要求,小于天然冰规定的 1—2s,为 0.22—0.63s。

3.4 向上和向下加载弯曲强度基本相同,证实了细粒酒精模型冰的各向同性。

3.5 模型冰的弯曲强度受冰内未冻液含量、密度控制。根据热能平衡的观点,引入评价该模型冰物理力学性质的新指标:  $\theta \cdot t / h^2$ ,并得到实验证明。

### 参 考 文 献

- 史庆增,徐继祖,宋安,1991.海冰作用力的模拟实验.海洋工程,9(1):16—22
- 隋吉学,李福成,李志军等,1988.渤海海冰抗弯强度的现场试验研究.中国海洋平台,3:7—10
- 隋吉学,孟广琳,李志军等,1996.环渤海海冰弯曲强度影响因素分析.海洋环境科学,15(1):73—76
- Jalonen R, Ilves L, 1990. Experience with a chemical-doped fine grained model ice. In: Proceedings of IAHR Ice Symposium, Espoo, 2: 639—651
- Hayward R, Lindholm J-E, 1993. Ice model tests of a cylindrical structure. In accordance with 19th ITTC performance in ice covered waters committee, M-170, Espoo: Helsinki University of Technology Press, 1—50
- Kujala P, Ralph S, 1994. A ship in compressive ice, Results of model scale tests to study pile-up process of ice, report from the joint Finnish-Russian research project, M-191, Espoo: Helsinki University of Technology Press, 1—56
- Li Zhijun, Riska K, 1996. Preliminary study of physical and mechanical properties of model ice. M-212, Espoo: Helsinki University of Technology Press, 1—100

## EXPERIMENTAL STUDY ON THE FLEXURAL STRENGTH OF FINE GRAIN ETHANOL MODEL ICE

LI Zhi-jun, RISKKA Kaj<sup>†</sup>

(National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian University of Technology, 116024)

<sup>†</sup>(Helsinki University of Technology, FIN 02150, Espoo, Finland)

**Abstract** The fine grain ethanol model ice, used in the Arctic Offshore Research Centre (AORC), Ship Laboratory, Helsinki University of Technology, is of international standard for modeling interactions between model ice and structures (ships). One of the important laboratory simulation results is concerned with the model ice properties. For the interactions with inclined structures and ships, such as cone man-made islands, lighter towers, wave dams and ice-breakers, model ice flexural strength is one of the dominant factors. A series of experimental studies have revealed the physical and mechanical properties of fine grain ethanol model ice and their relations to the known ice-making conditions (i.e. air temperature in ice basin, time periods of decreasing and increasing air temperature, and model ice thickness) and yielded a new index,  $\theta \cdot t / h^2$  based on the energy balance. This paper presents the experimental study theory, method and results on the fine grain ethanol model ice flexural strength. The effects of buoyancy, loading rates and loading directions on the model ice cantilever beam flexural strength are discussed. The authors' findings that flexural strengths loading downwards and upwards are nearly the same (the homogeneity of the fine grain model ice) are confirmed. The processes affecting the strength with loading rates are similar to those for the natural sea ice in the Bohai Sea. The effect of buoyancy on the strength is smaller than the error which comes from tested data. The flexural strength depends on its physical properties, and decreases with ice density, the increasing of unfrozen solution in the ice, and the increase in the new evaluation index. From energy balance, the larger the index is, the more the unfrozen solution in the ice is, and the higher the ice density.

**Key words** Fine grain ethanol model ice    Flexural strengths    Experimental study

**Subject classification number** P731.15