

# 细粒酒精模型冰物理力学性质 评价的新指标\*

李 志 军

Riska Kaj

(国家海洋环境监测中心, 大连 116023)

(赫尔辛基理工大学, 芬兰爱斯堡 02150)

**摘 要** 依据酒精细粒模型冰制冰过程中的物理本质和控制细粒酒精模型冰物理力学性质的物理本质, 建立了一项适合于喷雾技术细粒模型冰性质评价综合指标. 阐明了这一评价指标的物理意义, 并给出这一指标与细粒酒精模型冰物理力学性质参数的关系.

**关键词** 细粒酒精模型冰 物理力学性质 评价指标

## 1 引言

细粒酒精模型冰是添加 0.1% 酒精的溶液, 通过雾化冷凝成冰粒, 沉降于溶液表面, 再经过固结、回温制作成的一种模型冰. 其制冰技术虽被掌握, 但如何利用制冰时的可控条件, 即温度、时间、液体浓度等实现理想的人造模型冰, 达到符合设计相似比尺要求的物理力学性质, 是个较难回答的问题. 在过去的工作中, 赫尔辛基理工大学北极近海研究中心主要是依靠经验, 达不到定量描述的程度. 之后, 也引用了引晶柱状模型质量评价指标, 效果不十分满意, 主要原因是制冰工艺不同, 控制模型冰物理本质的外界参数也不同. 因此, 必须寻求一个适合细粒酒精模型冰的综合评价指标<sup>[1]</sup>. 该指标要体现制冰过程的物理本质, 并能通过这个有物理意义的指标, 达到预报模型冰性质的目的.

由于模型冰在性质上远远不同于天然冰, 所以天然冰力学参数的内在关系, 在模型冰中不完全成立, 必须就模型冰的各种性质做全面的实测和评估.

## 2 细粒酒精模型冰制作过程的物理意义和内在控制指标

试验在芬兰赫尔辛基理工大学完成. 细粒酒精模型冰的制作过程一般分 3 个阶段, 即溶液雾化喷出、冰粒固结和回温. 根据该模型冰制作完成时间和模型试验时间决定是否增加保

本文于 1998-11-07 收到, 修改稿于 1998-07-06 收到.

\* 国家海洋局青年海洋科学基金资助项目(96-505), 国家教委重点科技资助项目(97-87).

第一作者简介: 李志军, 男, 38 岁, 研究员, 博士, 现在大连理工大学从事土木、水利博士后研究工作.

留阶段<sup>[2]</sup>。作为化学添加剂的酒精,除对液体冻结温度直接影响外,其他均间接地体现在物理力学性质中。对该模型冰的化学影响过程不属本文讨论的范畴。

喷雾过程的物理实质是将溶液加压雾化成水珠,让水珠在空中降落过程中冻结,落在池内液体表面上。细粒模型冰一直靠循环喷雾增加厚度,因此细粒酒精模型冰厚度不仅取决于制冰的气温和时间,还取决于喷水流量、拖车运动速度和时间。细粒酒精模型冰的粒径和冰内初始未冻液体含量除与制冰时的喷水流量和拖车运动速度有关外,还与制冰时的气温有关。

固结过程是令该模型冰内的未冻液体冻结。通过冻结,冰内未冻液体减少到一定程度,实现未冻液包裹体在分布上、大小上趋向一致。

回温过程则是未冻液体的增加,它使该模型冰力学性质达到预想的强度值。回温后模型冰与喷雾后模型冰的区别就是未冻液包裹体分布和大小更均匀,保证了冰力学性质的各向同性。因此,冰内未冻液体含量是控制细粒酒精模型冰质量的主因。图1归纳了制冰各阶段对模型冰质量贡献的物理本质。

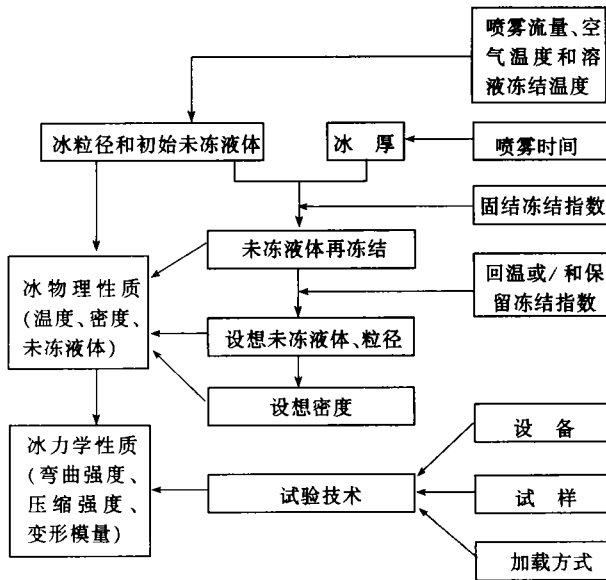


图1 模型冰制作过程中控制冰质量的物理原理

### 3 细粒酒精模型冰中未冻液体的理论基础

细粒酒精模型冰中未冻液体是控制其物理力学性质的主导因子,如何确定在一定气温条件下的固结时间和一定气温下的回温时间来控制模型冰内的未冻液体含量,是实现模型冰设想物理力学性质的关键。假设细粒模型冰内的孔隙完全被未冻液体填充,固结和回温过程仅仅造成未冻液体的冻结或消融,而不引起冰厚变化。实测证明,这一假定完全适合酒精细粒模型冰。因此,可以引用冰层生长模式描述未冻液体的冻结或消融。

斯蒂芬单层天然冰生长的简单模型是假设冰内温度呈线性分布,冰层底面温度为水的冻结温度,冰生长厚度为<sup>[3]</sup>

$$h^2 = \frac{2k}{\rho L} \int_{t_0}^t (\theta_f - \theta_i) dt, \quad (1)$$

式中,  $h$  为冰厚;  $\theta_f$  为冰层底面温度, 等于水的冻结温度;  $\theta_i$  为冰层表面温度;  $k$ 、 $L$  和  $\rho$  分别为冰的导热系数、潜热和密度;  $t_0$  为连续冰层生长的时间.

冰面温度由冰面以上气温确定. 采用牛顿的表面放热公式表示, 两者关系为

$$\theta_i = \alpha^2 \theta_a, \quad (2)$$

式中,  $\alpha$  为放热系数;  $\theta_a$  为冰层表面空气温度. 这时冰厚为

$$h = \lambda \left( \int_{t_0}^t (\theta_f - \alpha^2 \theta_a) dt \right)^{1/2}, \quad (3)$$

式中,  $\lambda^2 = \frac{2k}{\rho L}$ . 斯蒂芬用一个统计系数  $a$  来表示天然冰层表面以上气温、冻结温度、表面积雪或风等的影响, 对某种条件下的冰生长,  $a$  是一固定系数. 这样冰厚生长的通用表达式为

$$h = a \left( \int_{t_0}^t (\theta_f - \theta_a) dt \right)^{1/2}. \quad (4)$$

Lepparanta 和 Hakala<sup>[4]</sup>把上式发展到含孔隙冰脊的固结层厚度计算. 新生冰脊孔隙内未冻水在持续低温下冻结, 其固结层厚度计算式为

$$h = a \left( \frac{1}{p} \int_{t_0}^t (\theta_f - \theta_a) dt \right)^{1/2}, \quad (5)$$

式中,  $p$  为孔隙率. 反过来, 如果计算孔隙率, 则得

$$p = a^2 \left( \frac{1}{h^2} \int_{t_0}^t (\theta_f - \theta_a) dt \right)^{1/2}. \quad (6)$$

将式(6)用于细粒酒精模型冰, 由于假设孔隙内充满未冻液体, 所以未冻液体积比( $W_u$ )与孔隙率相同, 它是气温、冻结温度、时间和冰厚的函数, 即

$$p = W_u \propto \frac{(\theta_a - \theta_f)t}{h^2}. \quad (7)$$

式(7)的右边是  $\theta t/h^2$ , 这3个参数, 即温度、时间和冰厚在制冰过程中可以控制, 所以  $\theta t/h^2$  为细粒酒精模型冰物理力学性质评价的综合指标. 对于赫尔辛基理工大学北极近海研究中心的制冰条件, 该指标的单位是  $^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}/\text{mm}^2$ .

#### 4 综合评价指标的物理本质

综合评价指标不仅考虑了制冰阶段的温度和时间对该模型冰质量的影响, 而且还考虑了冰厚度的效应. 冰厚度间接地反映喷雾阶段的喷雾速度和时间. 这一指标与引晶模型冰利用的冻结指数有所不同. 引晶模型冰与天然冰一样, 是在连续冰层形成之后, 新的冰晶从冰层的底面向下冻结生长, 为柱状冰. 它们的厚度由冰生长期间的冻结指数来控制. 但细粒酒精模型冰厚度却是另一回事, 它决定于喷雾的时间和流速, 而流速和气温联合起来决定冰粒内初始未冻液体含量. 赫尔辛基理工大学北极近海研究中心冰池的制冰设备和气温在特定的时间内

均保持不变,所以可以认为细粒酒精模型冰中的初始未冻液体含量对于冻结温度相同的酒精溶液来讲是一致的.

冻结过程的冻结指数( $\theta t$ )使冰内未冻液体减少,而冻结指数的大小反映冰内有相变或无相变时储热能量.这些能量究竟使冰内多少未冻液体冻结还与模型冰总质量有关,即直接与冰厚有关.回温过程的融化指数具有同等意义,以往利用喷雾或固结冻结指数和融化指数评价细粒酒精模型冰性质都没有发现较好的效果,主要原因是无法体现单位质量细粒酒精模型冰的储热能力.文献[5]在评价柱状模型冰时使用的  $t/h^2$  也不完全适用于细粒模型冰,这是因为柱状冰是利用某一制冰过程来评价,其温度一致,无需考虑温度效应.

对同种酒精溶液,模型冰的粒径均匀一致,冰内未冻液体含量成为唯一主要控制因子,并且这一因子与固结和回温过程直接有关,它是这两过程中纯储热能力的综合体现,所以新的评价指标是以固结和回温过程中净的  $\theta t/h^2$  为基础,它间接表示冰内未冻液体含量.

## 5 综合指标与细粒酒精模型冰物理力学性质的关系

细粒酒精模型冰物理力学性质测试方法已做过介绍<sup>[2]</sup>,冰的密度用原位冰块浮力差求得;用长方形冰样原位挤压法实测单轴压缩强度,并通过破坏强度与加载速率的关系确定出单轴压缩峰值强度;用原位悬臂梁法,向上或向下加载实测弯曲强度;利用平面弹性板壳理论建立的方法测量变形模量,即通过实测一定重物重心附近的板壳挠度而得到特征长度,然后再利用弹性模量与特征长度的理论关系计算出变形模量,其中设定该模型冰的泊松比为 0.3.表 1 归纳出细粒酒精模型冰评价指标和相应实测物理力学性质参数.利用这些结果,可以分析两者间的定量关系.

表 1 细粒酒精模型冰制冰综合指标与相应物理力学参数

日期	冰厚/ mm	综合指标/ $^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}\cdot\text{mm}^{-2}$	密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	未冻液体/ %	压缩强度/ kPa	向下弯 曲强度/ kPa	向上弯 曲强度/ kPa	变形模量/ MPa	特征长度/ mm
1995-03-24	35.0	0.004 678		11.050	21.80	21.81	32.31	81.42	424.72
1995-03-24	22.0	-0.009 860	941.20	8.545	41.60	77.94	47.53	274.53	469.61
1995-04-05	49.0	-0.016 130	939.15	7.830	45.60	49.67	50.53	190.46	675.13
1995-04-12	30.0	-0.020 080	921.09	7.555	56.80	106.23	113.93	436.37	575.88
1995-04-21	30.0	-0.038 290	924.17	6.425	81.20	157.16	105.04	460.61	581.71
1995-04-26	62.0	-0.018 270			47.46	61.07	51.57	260.53	576.55
1995-04-26	62.0	-0.012 850			39.92	41.30	52.35	208.41	561.44
1995-04-27	61.0	-0.005 490	932.78	9.155	27.10	24.56	37.70	130.74	724.59
1995-05-23	33.0	-0.017 960			22.00	14.30	12.71	63.53	580.51
1995-05-23	33.0	-0.014 100	981.57	18.650	20.00	12.79	13.13	42.27	530.66
1995-05-30	58.5	-0.037 190	978.48	7.750	44.83	99.47	122.92	477.08	970.10
1995-05-30	59.0	-0.030 010	979.24	8.200	35.75	69.65	95.01	221.53	805.45
1995-05-31	58.5	-0.016 340	981.09	14.780	27.60	32.38	41.49	53.85	563.04

细粒酒精模型冰的力学性质由模型冰物理性质控制,反映模型冰物理性质的内部因子是冰内未冻液体含量,即孔隙率.由于难以准确测量和评估冰内未冻液体含量,故冰密度常被用来表征冰内未冻液体含量.实测一定时间下名义未冻液体含量和模型冰密度与新的评价指标( $\theta t/h^2$ )有良好的试验关系.图 2 和 3 分别给出细粒酒精模型冰名义未冻液体含量和密度与

新指标( $\theta t/h^2$ )的关系. 为了比较, 曾就细粒酒精模型冰密度和未冻液体含量与其他制冰条件评价指标, 如固结和回温热储备、纯热储备等也做了分析, 结果表明它们均没有用新指标表征的确切<sup>[1]</sup>. 由于  $\theta t/h^2$  是控制细粒酒精模型冰内未冻液体的直接参数, 所以它是该模型冰物理力学性质的控制参数.

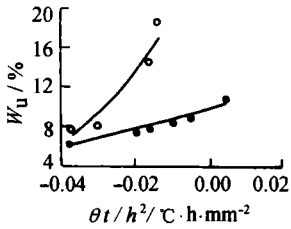


图2 名义未冻液体含量与综合评价指标的关系

- 酒精溶液冰点:  $-0.13^{\circ}\text{C}$
- 酒精溶液冰点:  $-0.21^{\circ}\text{C}$

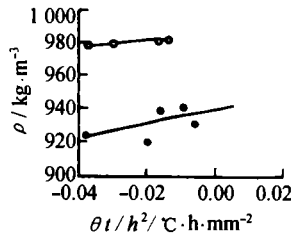


图3 密度与综合评价指标的关系

- 酒精溶液冰点:  $-0.13^{\circ}\text{C}$
- 酒精溶液冰点:  $-0.21^{\circ}\text{C}$

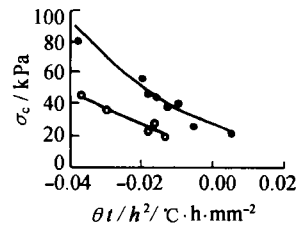


图4 单轴压缩强度与综合评价指标的关系

- 酒精溶液冰点:  $-0.13^{\circ}\text{C}$
- 酒精溶液冰点:  $-0.21^{\circ}\text{C}$

图4、5、6分别给出该评价指标与模型冰压缩强度、弯曲强度和变形模量之间的关系. 这些关系也正是试图表示制冰可控参数评估模型冰力学性质的方法. 评价指标越高, 未冻液体含量越高, 冰的力学强度越低. 但冰池溶液冻结温度不同, 在相同制冰喷雾流量和温度下所形成的冰粒径不同, 引起冰结构上的差异, 也必定引起力学性质的差异, 所以溶液冻结温度越低, 图4反映的单轴压缩峰值强度也偏低. 与图4类似, 图5所示的弯曲强度与评价指标的关系也随评价指标增高而减小, 且溶液冻结温度降低, 弯曲强度相应降低. 变形模量与综合评价指标同样呈衰减关系. 溶液冻结温度效应仍然存在, 并且数据有一定的分散性, 这是挠度测量误差引起的结果.

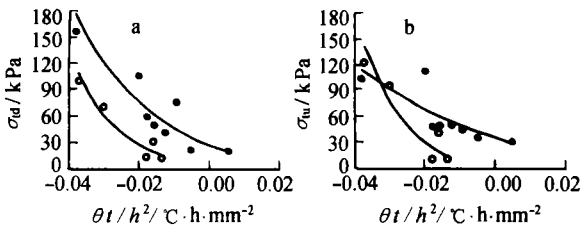


图5 向下弯曲强度与综合评价指标的关系

- 酒精溶液冰点:  $-0.13^{\circ}\text{C}$
- 酒精溶液冰点:  $-0.21^{\circ}\text{C}$

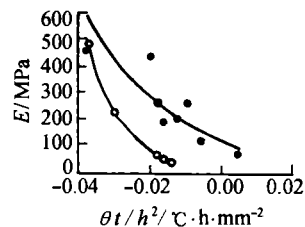


图6 变形模量与综合评价指标的关系

- 酒精溶液冰点:  $-0.13^{\circ}\text{C}$
- 酒精溶液冰点:  $-0.21^{\circ}\text{C}$

## 6 结论

6.1 新的评价指标是体现细粒酒精模型冰净储热能力的一元因子. 由于该模型冰在整个制作过程中只发生相变, 不发生温度变化, 所以它也是反映冰内未冻液体含量的综合指标. 试验资料对比分析表明冰内名义未冻液体含量与新指标的关系最佳, 其他关系除以净储热能力表示外, 数据均比较分散, 并且净储热能力还不能反映冰厚的效应. 虽然冻结指标曾作为引晶模型冰的评价指标, 但与细粒酒精模型冰的关系并不那么好, 与细粒酒精模型冰的未冻液体含量

也没有明显的关系。

**6.2 热能储量**,即冻冰指数和融冰指数曾被一些作者作为控制指标对不同模型冰,其中也包括对细粒酒精模型冰进行质量评价。虽然细粒酒精模型冰内名义未冻液体含量或冰密度与该指标有一定趋势,但数据分散,这是由于细粒酒精模型冰在厚度增长的过程中与冻冰指数无关。只使用固结或回温时冻冰和融冰指数,虽然已考虑了能量,但却没有考虑冰厚。对于相同的热能储量,模型冰厚度不同,其冰内的未冻液体含量会有很大差别,这是热能储量用于细粒酒精模型冰不理想的主因。在文献[5]中使用了指标  $t/h^2$ ,它考虑了冰厚,但仍然不适合细粒酒精模型冰。这个指标表示盐水冰表面温度突然降低或上升到另一温度  $\theta_a$  时,冰内温度达到线性分布时所需的时间,该时间与  $\theta_a$  和盐度无关,但与冰厚的平方成反比<sup>[6]</sup>。这在无相变问题中是正确的。根据冰温测量结果,细粒酒精模型冰达到理想力学性质的物理过程是使冰内含一定量的未冻液体。这是一个有相变的过程,而新指标  $(\theta t/h^2)$  对有相变的任何制冰过程都是最一般的表征。

**6.3 过去赫尔辛基理工大学**依靠经验控制细粒酒精模型冰质量,达不到量化的要求。新指标与细粒酒精模型冰的物理性质指标,即未冻液体含量、密度、单轴压缩强度、弯曲强度和变形模量之间均存在良好关系。由于制冰过程中的温度、时间和厚度均能人为设计和控制,所以利用新的综合评价指标能定量控制细粒酒精模型冰质量。

## 参考文献

- 1 Li Zhijun, Riska K. Preliminary Study of Physical and Mechanical Properties of Model Ice. Espoo: Press of Helsinki University of Technology, 1996, 100
- 2 李志军, Riska K. 细粒酒精冰的物理力学性质测试方法. 见:第五届全国冰川冻土学大会论文集(上册). 兰州: 甘肃文化出版社, 1996, 565~571
- 3 Pounder E R. Ice Physics. London: Pergamon Press Ltd., 1965, 147
- 4 Lepparanta M, Hakala R. Field measurements of the structure and strength of first-year ice ridges in the Baltic Sea. In: Proceedings of OMAE'89, Vol. IV, the Hague, 1989, 169~174
- 5 Hirayama, Ken-ichi. Properties of urea-doped ice in the CRREL test basin. U. S. Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, CRREL Report83-8, Hanover, 1983, 43
- 6 Schwarz J, Miloh T. On the time dependent temperature variation within ice sheets. In: Proceedings of IAHR Ice Symposium. Vol. 2. 1972, 262~269

## A new index for evaluating the physical and mechanical properties of fine grain ethanol model ice

Li Zhijun,<sup>1</sup> Riska Kaj<sup>2</sup>

1. National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023

2. Helsinki University of Technology, FIN 02150, Espoo, Finland

**Abstract**—A new index for evaluating any kind of fine grain model ice properties is set up based on the physical essence in ice making and model ice. The theoretical basement of the index and the experimental relationships between the index and each main parameter of the ethanol model ice physical and mechanical properties are given.

**Key words** Fine grain ethanol model ice, physical and mechanical properties, evaluation index