

DUT-1 合成模型冰的弯曲强度和弹性模量实验分析

李志军, 王永学, 李广伟

(大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 依据渤海海冰物理和力学特征值和国内水池实验室能力, 以 1:10~1:30 比尺要求, 发展了 DUT-1 合成模型冰。文中简介该模型冰的理想参数、成分和制备过程。就其弯曲强度和弹性模量进行系统的实验分析。通过 500 多次弯曲实验, 获得该模型冰在不同加载速度下的破坏方式, 各向同性证据和弯曲强度为 35~65 kPa 和弹性模量平均 53 MPa 的结果。并且得到弯曲强度和弹性模量在实测湿密度范围内呈递增关系, 浸水模型冰性能稳定时间超过 4h, 弹性模量与弯曲强度之比 82% 超过 2000。

关键词: 合成模型冰; 弯曲强度; 弹性模量; 实验分析

中图分类号: P 731.15; P 343.6 文献标识码: A 文章编号: 1001-6791(2002)03-292-06

西部大开发战略、环渤海开发战略、南水北调战略和我国北方内河输水、航运都能涉及到冰凌问题, 利用物理模拟技术进行充分的科学论证将取得事半功倍的效果。我国天津大学应渤海油气开发的需要引用加拿大冻结尿素模型冰开展许多冰与结构作用力的试验研究^[1]。鉴于我国冰工程的范围和气温特点, 为充分利用常温水池实验室设备, 发展一种非冻结模型冰材料具有重大科学技术意义^[2]。笔者在总结渤海辽东湾海冰物理和力学性质特征参数的基础上^[3], 于 1999 年 2 月确定了 DUT-1 模型冰配方。该模型冰是由聚丙烯粒、白水泥和水混合搅拌、铸模、养生制成的材料^[4]。它可以按 1:10~1:30 比尺进行水动力和准水动力条件下冰行为和冰对结构作用力的物理模拟实验。为了检验该模型冰的性能和适用范围, 针对其物理和力学性质指标进行了系统实验研究并开展模型冰同波浪、模型冰同圆桩、圆锥和半圆堤结构物相互作用的物理模拟实验研究^[5]。其中, 模型冰弯曲强度和弹性模量是冰与波浪和冰与斜面水工结构相互作用的关键指标, 也是评价模型冰性能的必要要素。本文专门讨论 DUT-1 模型冰弯曲强度和弹性模量性能, 并与天然海冰和同类结构的冻结模型冰进行对比分析。

1 模型冰的理想弯曲强度和弹性模量

DUT-1 合成模型冰以解决冰层作用力问题的物理模拟实验研究为目标。如果模型冰的各种力指标与原型相应指标满足同一比尺(λ)时, 动力相似得以满足。因此要求模型冰弯曲强度和弹性模量均以比尺(λ)降低。天然冰的性质取决于冰温和冰类型, 而合成模型冰通过自身结构

收稿日期: 2001-04-02; 修订日期: 2001-09-27

基金项目: 国家杰出青年基金(59725919); 中国博士后科学基金资助项目(986)

作者简介: 李志军(1960-), 男, 河北崇礼人, 教授, 博士后, 主要从事寒区工程环境条件和环境保护研究。

的调整服从相似比尺的要求。由于天然冰的性质受诸多因素影响, 各种力学指标在一定范围变化, 所以首先以辽东湾海冰物理和力学性质特征值为依据, 然后以 1: 10~ 1: 30 比尺确定模型冰的理想值。最后通过调整模型冰的控制因子改变模型冰的性质, 实现对河冰、湖冰等天然冰的模拟。此外, 还需保证模型与原型具有相同的密度 (即 $\rho = \rho_n$)。

辽东湾海冰物理和力学特征参数为: 密度 880~ 920 kg/m³; 弯曲强度 450~ 750 kPa; 弹性模量 1.2~ 4.0 GPa; 弹性模量/弯曲强度为 4200^[3]。以模型比尺为 1: 10~ 1: 30 设计, 模型冰的理想密度为 920 kg/m³; 弯曲强度为 15~ 75 kPa; 弹性模量为 40~ 400 MPa; 弹性模量/弯曲强度为 4200。由于国际上现有模型冰的弹性模量/弯曲强度均小于天然冰情况, 所以认为该比值大于 2000, 模型冰的破坏现象才同现场一致。从而, 国际上将该比值作为考核模型冰性能的指标之一。

2 弯曲强度分析

模型冰的弯曲强度测试采用三点简支梁和原位悬臂梁两种方法。三点简支梁使用的试样厚 20 mm, 宽 30 mm, 长 200 mm; 简支梁跨距 190 mm 或 175 mm。实验时每 5~ 6 个试样为一组, 在同一压头运动速度下完成。悬臂梁试样是从模型冰层中切割出梁的三个边, 第四边保留与冰层相连。悬臂梁尺寸: 长度为厚度的 4.0~ 7.5 倍, 宽度为厚度的 1.75~ 2.10 倍。在悬臂梁的自由端加载, 直到悬臂梁在近根部破坏。采样频率为 100 Hz。实验中, 6 至 10 根悬臂梁为一组, 在同一压头运动速度下进行。悬臂梁加载方式分向下加载破坏(顶部拉伸)和向上加载破坏(底部拉伸)两种, 进行 3~ 5 个不同压头运动速度的实验。

位移测量使用 5CB-10C 型精密数字位移计。其测量范围 ± 5 mm, 线性度 0.05%, 分辨率 0.001 mm。荷载测量采用量程为 1 kg 的应变式力传感器, 测量精度为 ± 1 g。

三点简支梁弯曲强度实验共进行 300 余次, 系统地检验弯曲强度随应力速率的关系和试样浸水后弯曲强度的稳定性。悬臂梁弯曲强度实验进行 4 批 200 余次, 用于检验模型冰的各向同性和弯曲强度的应力速率效应和湿密度效应。

2.1 弯曲应力速率效应

三点弯曲强度实验表明, 合成模型冰同天然冰和冻结模型冰类似, 其弯曲强度也依赖于弯曲应力速率。这种依赖关系类似黄河口附近海区低盐度海冰三点简支梁弯曲强度与应力速率的实验关系^[6], 即弯曲强度随应力速率增加首先增加, 在某一弯曲应力速率时出现峰值弯曲强度, 之后又随应力速率增加而减少。实验结果表明, 峰值弯曲强度发生在 350~ 400 kPa/s 的范围内, 对应的压头运动速度为 0.8~ 1.0 mm/s, 破坏时间为 0.03~ 0.38 s, 见图 1。而悬臂梁峰值弯曲强度发生在 60~ 65 kPa/s, 对应的压头运动速度为 2.46 mm/s, 破坏时间为 0.5~ 0.76 s。

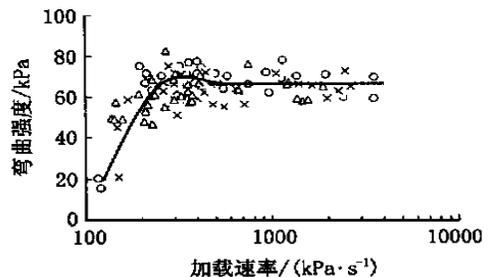


图 1 极限三点弯曲强度与弯曲应力速率的关系

Fig. 1 Relations of flexural strengths and stress rate

国际上建议天然冰弯曲强度实验的破坏时间在 1~ 2 s 之间^[7], 如果模型比尺是 1: 10~

1: 30, 对应天然冰的弯曲破坏时间 1~ 2 s, 模型冰弯曲破坏时间应缩小到 0. 18~ 0. 63 s。以上破坏时间均在这一范围, 说明模型冰弯曲破坏的韧脆过渡区同天然冰一致。

2.2 浮力效应

悬臂梁破坏时的浮力效应由加载历时的浮力过程估算。在比较悬臂梁法与三点简支梁法的实验结果时, 必须使用消除浮力效应的弯曲强度。比较分析实验结果发现, 当悬臂梁下弯破坏时, 有浮力效应的弯曲强度是无浮力效应的 1. 03~ 1. 21 倍, 平均 1. 07 倍; 当悬臂梁上弯破坏时, 有浮力效应的弯曲强度是无浮力效应的 1. 03~ 1. 27 倍, 平均 1. 12 倍。

2.3 各向同性分析

由于天然冰层内存在温度梯度和冰晶体结构的差异, 所以悬臂梁上弯和下弯的弯曲强度存在差异。这种加载方向效应来自于冰表层或底层拉伸强度的差异^[6]。即使冰的晶体结构从表层至底层一致, 但因天然冰内存在温度梯度, 表层和底层的拉伸强度仍不一致。对于 DUT-1 合成模型冰, 没有温度和结构的差异, 属于各向同性材料。图 2 所示悬臂梁上弯和下弯弯曲强度的关系表明, DUT-1 模型冰确实属于各向同性材料, 这与同类结构的冻结细粒酒精模型冰的弯曲特点一致^[8]。

2.4 浸水稳定性

不同浸水时间试样的弯曲强度结果说明 DUT-1 模型冰浸水 1 h 后, 性质处于稳定并且可以持续 4 h。这一段时间足够进行冰与结构或冰行为的物理模拟实验。

2.5 模型冰湿密度效应

同天然冰和冻结模型冰相同, 模型冰密度影响弯曲强度, 即在湿密度范围内, 弯曲强度随湿密度的增加而增加(图 3)。虽然天然冰弯曲强度同密度的关系没有报道, 但辽东湾海冰压缩强度同密度的关系同 DUT-1 模型冰弯曲强度与湿密度的关系一致^[9]。

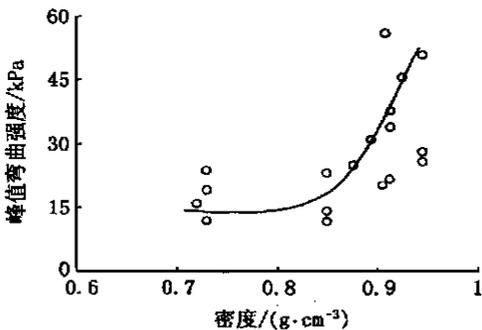


图3 弯曲强度与模型冰湿密度的关系

Fig. 3 Relationship between flexural and wetted density

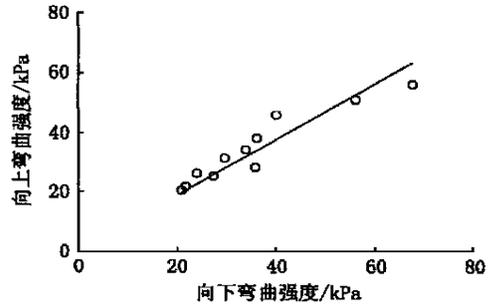


图2 模型冰向上和向下弯曲强度的关系

Fig. 2 Relation of flexural strengths upward and downward loading

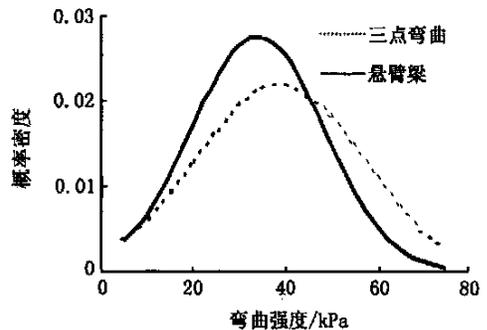


图4 弯曲强度正态分布

Fig. 4 Normal distribution of flexural strength

2.6 实验方法效应

对一次搅拌的原料同时采用三点弯曲法和悬臂梁法测量弯曲强度。将两种实验结果进行正态分析, 见图 4。由图可知, 悬臂梁弯曲强度比三点弯曲数据集中, 较理想。两种强度都集中在 40 kPa 左右。

3 弹性模量分析

DUF-1 合成模型冰弹性模量实验原理是弹性薄板的挠曲。具体方法是在模型冰冰层表面测量不同质量砝码引起的冰层挠曲变形, 即把一个砝码放在位移传感器附近, 测量由该砝码引起的挠曲变形, 拟合出弹性薄板的特征长度, 然后算出弹性模量^[8]。测量前记录从测量挠度点到砝码重心的距离, 然后施放砝码并约停留 20 s, 以便记录出一条挠度- 历时曲线。另外为了获取平行实验结果, 实测模型冰弹性模量时, 对同一冰层的三个不同部位用三种不同质量的砝码进行实验。挠度测量仍然使用 5CB-10C 型精密数字位移计。

3.1 砝码质量效应

天然冰是一种粘弹性复合材料, 它只有名义上的弹性模量。渤海海冰只在加载的瞬间有弹性存在, 而冻结模型冰, 无论是什么添加剂, 冻结成冰后蠕变仍然是不可回避的现象。测试细粒酒精模型冰弹性模量时发现当砝码质量超过 500 g 就出现蠕变现象^[10]。

DUF-1 合成模型冰没有冻结冰的成份, 但因其强度很低, 在大荷载下是否发生永久变形, 需要验证。实测 DUF-1 模型冰的厚度为 1 cm 和 2 cm, 最大砝码质量使用 500 g, 一般 200 g 以下。定量分析挠曲- 历时曲线, DUF-1 模型冰在 500 g 荷载条件下也不存在蠕变。

3.2 制冰工艺效应

每一块 DUF-1 合成模型冰的配方是相同的, 但搅拌时所用的时间有差异, 制作冰层时夯实程度也略有差异。

不同批次制备的模型冰冰排因养生时室内温度和光线的差异, 在实践中存在一定差异。实践中希望这种差异小到符合模拟试验要求。将 4 批 260 个实测数据依据肖氏取舍方法处理后得到 228 个有效数据制作成图 5 所示的弹性模量概率分布。这些样本的平均值为 53.24 MPa, 方差为 26.23 MPa, 与模型冰弯曲强度之比大于 2 000 的占 82%。根据渤海天然冰变化范围和国外其它模型冰的结果, 该弹性模量的范围满足实验要求。

3.3 吸水率和湿密度效应

与冻结模型冰相似, DUF-1 模型冰的湿密度影响弹性模量。图 6 给出模型冰湿密度与弹性模量的实验关系。虽因实测精度原因, 图中存在数据分散现象, 但整体趋势符合物理意义。在湿密度 880~ 920 kg/m³ 范围内, 吸水率处于 35%~ 55% 之间, 对应着模型冰骨料对水的毛细吸附作用, 模型冰的弹性模量随吸附水量的增加而增加。但当吸水率再增加时, 模型冰内存在重力水, 这时其对应的弹性模量反而下降。实践中多数模型冰的湿密度在 880~ 920 kg/m³ 之间, 与天然冰范围一致。

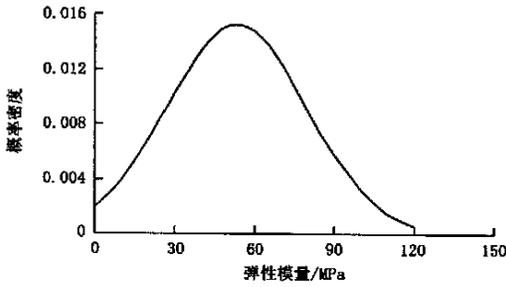


图5 模型冰层实测弹性模量的概率分布

Fig. 5 Normal distribution of measured elastic modulus

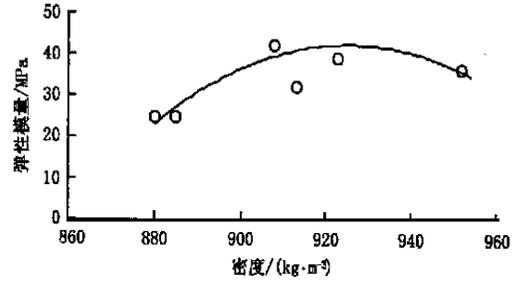


图6 弹性模量与模型冰湿密度的关系

Fig. 6 Relation of elastic modulus and wetted density

4 结 论

(1) DUT-1 合成模型冰的弯曲强度同天然冰相似, 随弯曲应力速率发生变化。其发生峰值弯曲强度时对应的破坏时间同冻结模型冰相同。悬臂梁上弯和下弯弯曲强度的关系表明, DUT-1 合成模型冰属于各向同性材料。在实测湿密度范围内, 模型冰的峰值弯曲强度随湿密度的增加呈增加趋势, 同渤海天然冰变化趋势一致。

(2) 实测 DUT-1 模型冰弯曲强度范围为 35~ 65 kPa, 浸水 1 h 后弯曲强度处于稳定并且可以持续 4 h。这一段时间足够保证完成冰与结构或冰行为物理模拟实验。

(3) 与冻结细粒酒精模型冰相比, DUT-1 合成模型冰在弹性模量测试过程中不存在明显的蠕变。在 880~ 920 kg/m³ 实测湿密度范围内, 模型冰的弹性模量随湿密度的增加呈增加趋势; 当湿密度继续增加, 弹性模量将减少。

(4) 根据渤海海冰弯曲强度 450~ 750 kPa, 模型冰可用于 1: 10 和 1: 30 比尺的模拟实验。弹性模量与弯曲强度之比大于 2000 的占 82%, 符合国际上对模型冰该指标的要求。DUT-1 合成模型冰是开展冰与斜面结构、冰与波浪、冰堆积、冰脊和冰塞物理模拟实验的理想功能材料。

参考文献:

- [1] 史庆增. 海冰的动力作用和冰力谱[J]. 海洋学报, 1994, 16(5): 106- 111.
- [2] 陈储军. 白山水电站导流底孔排冰的试验研究[J]. 泥沙研究, 1993, (3): 42- 52.
- [3] 李志军, 王永学. 渤海海冰工程设计特征参数[J]. 海洋工程, 2000, 19(1): 62- 65.
- [4] 李志军, 李广伟, 沈照伟, 等. DUF 1 模型冰的物理性质和弹性模量[J]. 自然科学进展, 2000, 10(10): 931- 935.
- [5] 李志军, 王永学, 李广伟. 非冻结合成模型冰开展冰作用力物理模拟实验研究的进展[A]. 第十届全国海岸工程学术讨论会论文集[C], 北京: 海洋出版社, 2001.
- [6] 隋吉学, 孟广琳, 李志军, 等. 环渤海海冰弯曲强度影响因素分析[J]. 海洋环境科学, 1996, 15(1): 71- 76.
- [7] Schwartz J, Frederking R, Gavrilov V, *et al.* Standardized testing methods for measuring mechanical properties of ice [J]. Cold Regions Science and Technology, 1981, 4(3): 245- 253.

- [8] Jalonen R, Ilves L. Experience with a chemical doped fine grained model ice[A]. In: Proceedings of IAHR Ice Symposium[C], Espoo: 1990, 2: 639– 651.
- [9] 李志军, 彭万巍, 吴紫汪, 等. 辽东湾海冰单轴压缩强度的孔隙率响应[A]. 第五届全国冰川冻土学大会论文集(上册)[C], 兰州: 甘肃文化出版社, 1996, 572– 578.
- [10] Li Zhijun, Riska K. Preliminary study of physical and mechanical properties of model ice[D]. M-212 Espoo: Helsinki University of Technology, 1996. 100.

Experimental analysis of flexural strength and elastic modulus of the DUT-1 model ice^{*}

LI Zhijun, WANG Yongxue, LI Guangwei

(State key laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The DUT-1 model ice is a new kind of synthetic model ice. Its characteristics, components and make processed are introduced. From a series of tests, the bending failures under different loading rates were obtained and the anisotropy behavior of the model ice was certified. It was found that its average flexural strength is 45 kPa and its average elastic modulus is 53.24 MPa. The flexural strength and elastic modulus increased with absorbed water amount and wetted density. Both became steady after water absorption 1 hour and kept the steady over 4 hours, which is longer enough for the performing model tests of ice interactions with structures and ice behavior. The ratio of elastic modulus and flexural strength was 82% over 2000, which indicates that the DUT-1 model ice has the capability for the physical modeling tests in the scale of 1:10~ 1:30 based on Bohai ice flexural strength of 450~ 750 kPa.

Key words: synthetic model ice; flexural strength; elastic modulus; experimental analysis

* The project is supported by Scientific Fund for National Outstanding Youth of China(No. 59725919) and China Postdoctoral Science Foundation(No. 986).