



水池常规模型冰的单轴压缩强度特征试验研究

徐佩 李龙辉 王超

Experimental study on uniaxial compressive strength characteristics of conventional model ice in tank

XU Pei, LI Longhui, WANG Chao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03466>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

盐水柱状模型冰弯曲强度数值计算分析

Numerical simulation analysis of flexural strength of columnar saline ice model

中国舰船研究. 2021, 16(5): 143–149 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.02195>

冰载荷和纵倾角对螺旋桨强度的影响

Effect of ice-load and trim angle on the strength of propeller

中国舰船研究. 2018, 13(4): 7–15, 32 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01037>

航行于碎冰区船舶冰阻力与冰响应探析

Analysis on ice resistance and ice response of ships sailing in brash ice

中国舰船研究. 2018, 13(1): 73–78 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-3185.2018.01.011>

冰水池结冰过程的数值模拟分析

Numerical simulation analysis of icing process in ice model tank

中国舰船研究. 2021, 16(5): 137–142 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.02113>

破冰船连续破冰的冰阻力预报

Prediction of ice resistance of icebreaker during continuous icebreaking

中国舰船研究. 2021, 16(5): 101–108, 120 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.02164>

平整冰层中海工结构冰载荷研究方法综述

Review of research on ice loading of offshore structures in level ice fields

中国舰船研究. 2021, 16(5): 39–53 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.02084>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

本文网址: <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03466>

期刊网址: www.ship-research.com

引用格式: 徐佩, 李龙辉, 王超. 水池常规模型冰的单轴压缩强度特征试验研究[J]. 中国舰船研究, 2025, 20(2): 266–282.

XU P, LI L H, WANG C. Experimental study on uniaxial compressive strength characteristics of conventional model ice in tank[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2025, 20(2): 266–282 (in Chinese).

水池常规模型冰的单轴压缩强度特征试验研究



扫码阅读全文

徐佩^{1,2}, 李龙辉², 王超^{*3}

1 江苏海洋大学 海洋工程学院, 江苏 连云港 222005

2 江苏海洋大学 马卡洛夫海洋工程学院, 江苏 连云港 222005

3 哈尔滨工程大学 船舶工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要: [目的] 在冰-螺旋桨切削或碰撞试验中, 采用满足几何相似和冰力学特性相似准则的模型冰对螺旋桨冰载荷的测试结果而言至关重要。[方法] 以淡水冰、盐水冰、尿素冰、混合乙二醇/脂肪族洗涤剂/糖(EG/AD/S)冰以及石蜡模型冰作为研究对象, 开展不同材质模型冰的单轴压缩试验, 对比测试分析不同应变速率以及冷冻和回温状态下冰试样的压缩强度和破坏模式。[结果] 采用冷冻温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 冷冻时间为48 h, 回温温度为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 回温时间为24 h所制作的盐水冰可以满足冰-桨的接触试验要求; 模型冰的压缩强度从大到小依次为尿素冰、淡水冰、EG/AD/S冰、石蜡模型冰、淡水冰-回温、EG/AD/S冰-回温、盐水冰、尿素冰-回温以及盐水冰-回温。[结论] 试验测试结果可为后续冰-螺旋桨切削或碰撞试验中模型冰的选择提供参考。

关键词: 淡水冰; 盐水冰; 单轴压缩强度; 冰-桨试验; 船用螺旋桨; 结冰; 压缩强度

中图分类号: U664.3

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.03466

0 引言

北极地区具有独一无二的政治、军事及经济地位,《中华人民共和国国家安全法》已将极地列为战略新疆域,但在极地区域的安全活动将不可避免地面海冰力学性能问题。海冰的单轴压缩强度是重要的力学性质参数之一,也是工程冰力学性质中最常用且测试技术最成熟的参数。由于冰-推进器作用而造成的海冰破坏形式主要为剪切破坏,并伴随着挤压破坏,因此,海冰压缩性质是推进器设计必须考虑的因素之一。此外,在直立结构物的抗冰问题中,冰抗压强度也是最为关键的参数。因此,有必要对冰的单轴压缩强度进行测试和分析,以探究适用于推进器的冻结模型冰和非冻结模型冰。

目前,国内外研究人员针对冻结冰和非冻结冰开展了一系列单轴压缩试验研究,国外的Hawkes等^[1-6]介绍了各种模型冰的单轴压缩试验情况;Moore等^[7]开展不同应变速率和不同温度

下混合乙二醇/脂肪族洗涤剂/糖(ethylene glycol/aliphatic detergent/sugar, EG/AD/S)模型冰的单轴压缩试验,并指出 $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 是冰-桨相互作用试验中遇到的典型温度。国内方面,李志军等^[8]开展细粒酒精模型冰的单轴压缩试验,发现高加载速率时冰样发生劈裂破坏,其压缩强度峰值小于100 kPa,明显低于淡水冰的压缩强度。田于逵等^[9]利用低浓度氯化钠溶液在小型冰水池内开展柱状盐冰的单轴压缩试验,分析柱状盐冰的破坏模式和断裂行为,其试验流程及测试方法为本文开展盐水冰的研制提供了指导借鉴。刚旭皓等^[10]采用离散元方法,引用元胞数组控制力的传递对柱状模型冰的弯曲强度进行了数值计算研究。

在淡水冰方面,沈乐天等^[11]测定天然淡水冰极限压缩强度随温度和应变速率的变化规律,发现试验温度越低,冰的极限压缩强度越高。罗天一等^[12]沿人工淡水冰的垂直冰晶生长方向进行加载,测试不同位移速率下的冰破坏模式和压缩

收稿日期: 2023-07-17 修回日期: 2023-09-23 网络首发时间: 2024-01-23 15:15

基金项目: 江苏省高等学校自然科学基金项目(23KJB580003); 国家自然科学基金资助项目(52171300)

作者简介: 徐佩,男,1990年生,博士,讲师。研究方向: 冰区推进器试验测试技术。E-mail: xupe_i_0824@jou.edu.cn

李龙辉,男,2000年生,硕士生。研究方向: 推进器在碎冰碰撞下的性能研究。E-mail: 19079095992@163.com

王超,男,1981年生,博士,教授。研究方向: 极区船舶航行性能。E-mail: wangchao0104@hrbeu.edu.cn

*通信作者: 王超

强度,发现人工淡水冰与天然冰具有类似的晶体结构。周庆^[13]针对哈尔滨某地的天然淡水冰开展系统的单轴压缩试验,讨论了单轴压缩强度与加载速率、加载方向、尺寸及密度等参数的关系。上述研究主要开展了淡水冰在冷冻状态下的单轴压缩试验,但并未详细分析淡水冰回温之后压缩强度的变化规律。

在天然海冰方面,张丽敏^[14]开展人工冻结冰、水库冰和海冰的单轴压缩试验,结果表明,温度对冰单轴压缩强度的影响非常明显,在相同的应变速率下,冰单轴压缩强度将随着温度的降低而增加。韩红卫^[15]的北极海冰和南极固定冰的单轴压缩试验,测试了单轴压缩强度与孔隙率、温度和加载速率之间的关系。Wang 等^[16]针对融冰期北冰洋的海冰开展单轴压缩试验,发现孔隙率和应变速率是海冰压缩强度的主要影响因素。陈晓东^[17]的平整冰和重叠冰的单轴压缩强度试验,发现了其韧-脆转化机理和破坏模式。上述研究主要涉及天然海冰的单轴压缩试验,但未考虑盐度对冰单轴压缩强度的影响。

在非冻结模型冰方面,王永学等^[18]利用聚丙烯粉、塑料微珠、水泥和水等研制非冻结的合成模型冰,其单轴压缩强度为 100~360 kPa,并已运用于防波堤结构和锥体结构的模型试验。田育丰等^[19]以石蜡、石膏粉、石英粉和硅粉等原料,通过引晶、钻孔缺陷控制、气泡缺陷控制以及分层结构等方式研制混合石蜡模型冰,其单轴压缩强度范围为 220~450 kPa。冯国庆等^[20]利用聚丙烯、黏合剂、添加剂和水研制非冻结可破碎的模型冰,其压缩强度为 0.16~0.23 MPa。上述非冻结模型冰的压缩强度和破坏模式均适用于开展螺旋桨模型试验,但由于非冻结模型冰与实际冰体在晶体结构、孔隙率等方面存在差异,所以试验测试结果的适用性和可靠性存在一定的局限性。

基于上述问题,根据国外研究人员提出的冻结模型冰和非冻结模型冰,本文拟在常规水池内分别开展淡水冰、盐水冰、尿素冰、EG/AD/S 模型冰以及石蜡模型冰的单轴压缩试验,通过测试和分析不同应变速率以及冷冻、回温状态下冰的压缩强度和破坏模式,从而探究适用于常规环境下冰区螺旋桨切削或碰撞试验的模型冰。

1 试验设备及原理

1.1 试验设备

试验设备主要包括力学试验机、低温试验箱及

低温冷冻柜等,其中:力学试验机为 WDW-30M 型多功能结构试验测试装置,其最大试验力为 30 kN,速度范围为 0.05~500 mm/min,主要用于开展冰的单轴压缩试验;低温试验箱用于控制温度,温度区间为 25~-40 ℃,调节的精度为 0.1 ℃,如图 1 所示;低温冷冻柜用于制备冻结冰试验样品,其制冷方式为直冷,冷冻能力为 37.5 kg/12 h,温度调节范围为 10~-40 ℃,温度差±1 ℃。



图 1 力学试验机
Fig. 1 Mechanical testing machine

此外,依据 ITTC-2017(7.5-02-04-02)的模型冰性能试验规程^[21],模型冰标准样品的长度×宽度×厚度尺寸分别为 4h×2h×h(h 为冰厚),所以设计了内部尺寸为 140 mm×70 mm×35 mm 的硅胶模具,如图 2 所示。



图 2 硅胶模具
Fig. 2 Silicone mold

1.2 试验原理及方法

在螺旋桨切削冰体过程中,存在着沿垂直于桨盘面法向、沿桨盘面旋转切向的 2 种冰-桨挤压作用模式,但螺旋桨的旋转速度一般远高于其轴向推进速度,故冰材料的破坏将以切向的发展为主,因此,螺旋桨对冰的切削作用将主要探讨切向的作用进程,而法向作用可以忽略。由于螺旋桨以一种高速切割的模式作用于冰体上,这种挤压作用对应了冰材料的高应变率变形特点,其压缩变形

表现为高度的脆性特征。同时,鉴于冰体裂纹的形成、扩展、冰体粘结作用以及晶体结构,可以推断出冰-桨作用模式主要由冰材料的剪切断裂行为所控制。因此,在模型试验中,冰材料力学行为特征应主要聚焦于其脆性剪切断裂行为,故需重点研究模型冰的单轴压缩试验。

为寻找适用于冰-螺旋桨接触试验的模型冰,需开展不同材质模型冰的单轴压缩试验。本文采用中国第5次北极科学考察中3个短期冰站作业期间测试的海冰为原型冰,其压缩强度分别为3.92, 4.75, 5.10 MPa。由于实尺度螺旋桨的直径为4.12 m,而试验时的螺旋桨模型直径为0.18 m和0.25 m,故需通过模型比尺 λ ($\lambda=16.48$ 和 $\lambda=22.88$)和冰力学特性相似准则($\sigma_s = \lambda \sigma_m \rho_s / \rho_m$,其中: σ_s 和 σ_m 分别为原型冰和模型冰的压缩强度; ρ_s 和 ρ_m 分别为原型冰和模型冰的密度)将原型冰的压缩强度缩尺到模型尺度^[22-23],经缩尺后,模型冰的压缩强度为160~300 kPa。因此,适合开展冰-桨接触试验的模型冰要求如下:1)模型冰的材料密度与原型冰一致;2)模型冰的压缩强度满足 $\sigma_m = \sigma_s / (\lambda \rho_s / \rho_m)$ 的相似关系,其中 $\sigma_m = 160 \sim 300$ kPa;3)模型冰的力学性质应聚焦于高速应变率下的脆性力学行为。

单轴压缩试验是测量材料抗压强度的常用手段。由于冻结冰的破坏过程具有较高的随机性,难以预测初生裂纹的起始位置与扩展路径,因此,也难以针对破坏起始点来测量应力,故实际工程中一般采用冰的强度来定义冰的最大抗力,且不考虑内部的微裂纹和微破坏结构,并通过试验所测量的最大试验力来确定冰的单轴压缩强度。冰的单轴压缩强度计算公式为

$$\sigma_c = \frac{F_N}{Bh} \quad (1)$$

式中: σ_c 为单轴压缩强度; F_N 为最大试验力(曲线顶点); B 为冰样的宽度。

单轴压缩试验的另一个重要参数是力学试验机的加载速率,其决定了冻结冰在测试中承受压力下的应变速率

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{t} = \frac{\Delta l}{tL} = \frac{v}{L} \quad (2)$$

式中: ε 为应变; t 为断裂时间; Δl 为变形; L 为试样加载方向上的长度; v 为试验机压头的位移速率。

此外,在冰单轴压缩试验过程中,参考中国船舶科学研究中心冰水池海冰模拟与测试研究的相关进程^[9],根据脆性和延性行为的可能区域,本文将单轴抗压强度测试的应变率分为3个部分,其中

最小应变率为 $1.19 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,中等、最大应变率分别为 $5.95 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 和 $5.95 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。对于给定目标范围,确定了从0.1~500 mm/min的加载速率,其中低、中和高应变速率时的加载速率范围分别为0.1~5, 6~120, 130~500 mm/min。

2 冻结冰单轴压缩试验

2.1 淡水冰的试验结果分析

1) 冷冻温度为 -20°C 。

为探究淡水冰在不同应变速率下的变化规律,以冷冻温度为 -20°C 为例,对淡水冰试样进行48 h冷冻,冷冻后的淡水冰试样如图3所示。

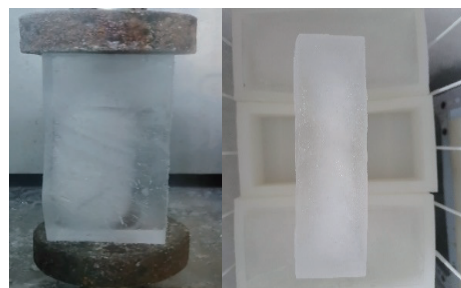


图3 淡水冰试样

Fig. 3 Freshwater ice specimen

根据1.2节应变速率的划分范围,依次开展不同应变率时淡水冰的单轴压缩试验,淡水冰试样压缩强度随应变速率的变化曲线、不同应变速率下淡水冰应力-应变曲线以及不同加载速率下淡水冰试样的破坏模式分别如图4~图6所示。

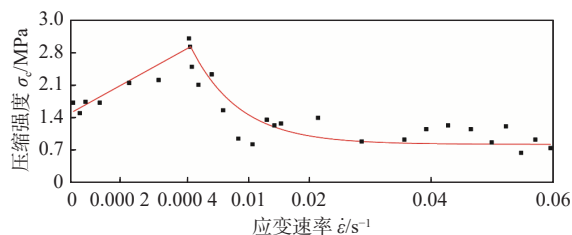


图4 淡水冰压缩强度随应变速率的变化曲线

Fig. 4 Variation curve of compressive strength of freshwater ice with strain rates

由图4可知:当应变速率小于 $3.57 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 时,随着应变速率的增加,压缩强度逐渐增加,此时压缩强度与应变速率之间存在一定的线性关系;当应变速率达到 $3.57 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 之后,压缩强度开始发生转折,其随着应变速率的增加而呈现出逐渐减小的趋势,且下降幅度相对较大;当应变速率为 $2.14 \times 10^{-2} \sim 5.95 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 时,随着应变速率的增加,压缩强度的下降幅度明显降低,其拟合曲线整体呈现出逐渐减小的趋势,但曲线周围的离散性较大。

图5所示为不同加载速率下的淡水冰应力-

应变曲线。

由图 5(a)可知,在低加载速率下,应力将随着加载的进行而逐渐增加,达到一定值后,随着加载的持续,应力反而逐渐减小,试样经历屈服和应变软化阶段后发生了韧性破坏,故其应力-应变曲线表现出韧性性质,相应的应变速率范围则定义为韧性区。

在图 5(b)中,随着加载过程的不断持续,应力将迅速增加到一定值后突然跌落,呈现脆性破

坏的典型应力-应变曲线形式,即当试样加载过程进入稳定阶段后,应力快速增长并在达到压缩强度后瞬间消失。根据应力-应变关系曲线的典型特征,试样的破坏过程由占主导作用的一次性破碎所支配。

对于图 5(c)的高应变速率的情况,其应力-应变曲线未表现出脆性破坏的典型表现形式,而呈现出一种先迅速增加而后迅速减小的趋势,且其从加载到冰试样破坏的整个历程时间相对较短。

图 6 所示为不同加载速率下的淡水冰破坏模式。

由图 6(a)可知,韧性区内的冰样破坏形式在低加载时将产生明显变形,但裂纹很少;随着加载速率的增加,裂纹数量也随之增多,在试验变形的同时,易产生贯穿的纵向劈裂裂缝,从而导致试样的鼓胀,其中裂缝数量尤以接近应力最大值时较多。总体而言,到达最大强度后的冰样整体基本完整,根据加载速率的不同,出现不同形式的变形并分布了数量不等的裂缝,其中少数冰样裂缝可能相互联结形成更大的裂缝,从而造成了部分冰块不同程度的剥离,但仍然保留了整体性。

在图 6(b)中,加载速率为 4~130 mm/min 时,对应 $4.76\times10^{-4}\text{ s}^{-1}\sim1.5\times10^{-2}\text{ s}^{-1}$ 的应变率,此时所有试样均呈现出劈裂形式的破坏;从开始加载到冰试样破坏的整个历程时间较短,仅能观察到试样迅速产生裂纹并发生破坏,且存在明显的主裂纹。

而在图 6(c)中,试样破坏模式基本为碎裂破坏,即由脆性破坏时的主裂纹向冰块内部的多条主裂纹转变,从而使试样在较短时间内碎裂为多条冰块,导致了整个试样破坏。

2) 冷冻温度为-20℃,回温温度为-5℃。

由图 4~图 6 可知,淡水冰的压缩强度明显高于目标压缩强度 160~300 kPa,因此,为降低淡水冰的压缩强度以满足冰-浆接触试验时的冰力学特性相似准则,参考冰水池的制冰流程,对淡水冰进行回温,且回温至-5℃后的淡水冰形态未发生明显的变化。

同时,以应变速率 $v=0.5, 2, 4, 6, 10, 70, 120, 330\text{ mm/min}$ 为例,分别对比有、无回温时试样的压缩强度,结果如图 7 和图 8 所示。

由图 7 可知:当加载速率 $v=0.5\text{ mm/min}$ 和 $v=2\text{ mm/min}$ 时,回温后的试样压缩强度略大于未回温的试样;随着加载速率的增加,回温后试样的压缩强度逐渐小于未回温试样,当加载速率 $v=330\text{ mm/min}$ 时,回温后试样的压缩强度为 0.518 MPa,而未回温试样的压缩强度为 1.16 MPa,

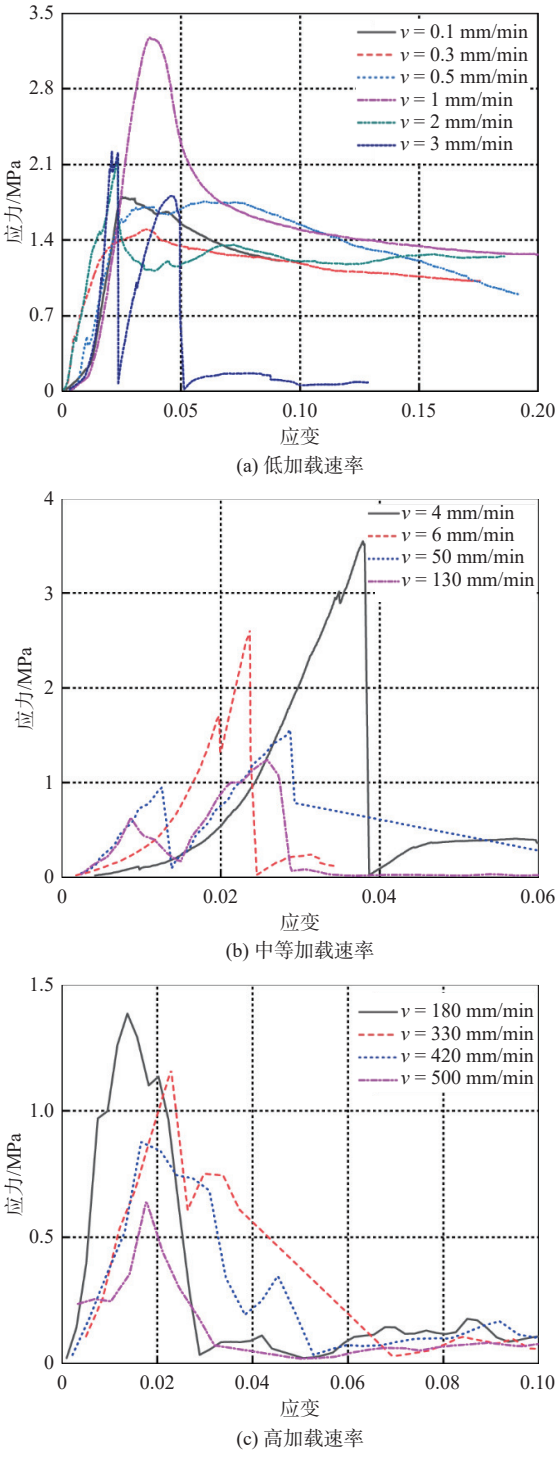


图 5 不同加载速率时的淡水冰应力-应变曲线
Fig. 5 Stress-strain curves of freshwater ice at different loading rates



图 6 不同加载速率时的淡水冰试样的破坏模式

Fig. 6 Failure modes of freshwater ice specimens at different loading rates

即回温使冰试样的压缩强度减小为原来的 0.44 倍, 所以回温对冰块压缩强度的影响较为明显。图 7 中回温后淡水冰的压缩强度范围为 0.518 ~ 2.41 MPa, 大于目标压缩强度 160~300 kPa。

图 8 以加载速率 $v=4\text{ mm/min}$ 为例给出未回温和回温时的应力-应变对比曲线, 可以看出冰试样未回温时的应力-应变曲线符合冰脆性断裂的典型特征, 而冰试样回温后的应力-应变

曲线则符合脆性与韧性行为之间过渡的破坏模式, 且应力峰值存在明显减小的趋势。

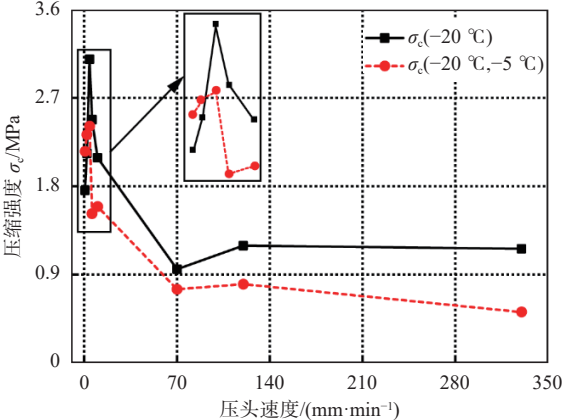


图 7 淡水冰冷冻与冷冻-回温时压缩强度的对比曲线
Fig. 7 Comparison of compressive strength during freshwater ice freezing and freezing-tempering

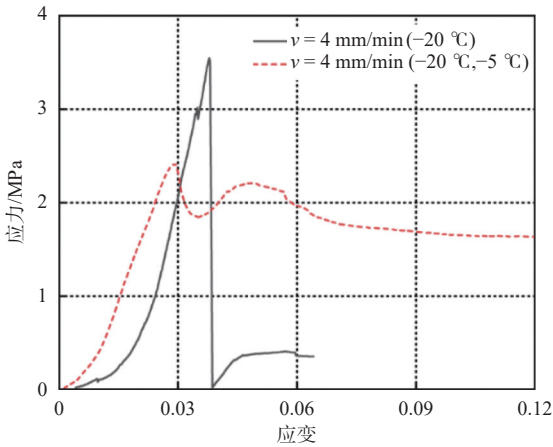


图 8 淡水冰冷冻与冷冻-回温时的应力-应变对比曲线
Fig. 8 Comparison of stress-strain of freshwater ice during freezing and freezing-tempering

图 9 所示为相同加载速率下未回温和回温时淡水冰试样的破坏形式对比结果。当加载速率 $v=4\text{ mm/min}$ 时, 回温导致其破坏形式由原来的劈裂破坏转变为韧性破坏; 当 $v=330\text{ mm/min}$ 时, 未回温时冰试样呈现多条主裂纹的碎裂破坏, 而回

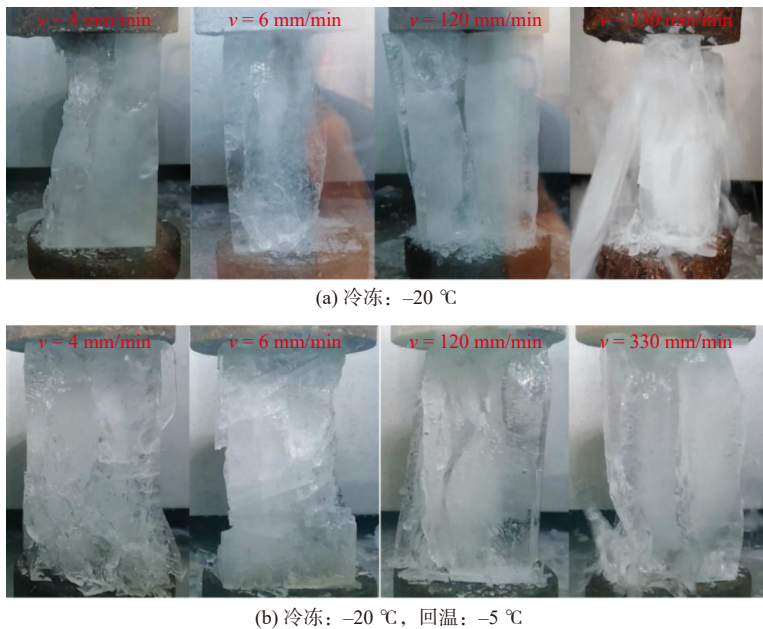


图 9 冷冻与冷冻-回温时淡水冰的破坏形式对比

温后的淡水冰试样则呈现为主裂纹的劈裂破坏。

2.2 盐水冰的试验结果分析

1) 冷冻温度为-20 ℃。

在盐水冰研制过程中, 根据文献 [24] 可知, 渤海海水和北极海水的盐度分别为 28‰ ~ 31‰ 和 30‰ ~ 32‰, 故本文将以海水盐度 30‰ 为例进行盐水冰的研制。图 10 所示为盐水冰混合溶液的制作过程及力学性能测试流程。

较平整, 故可采用质量-体积法进行密度的测量, 最终通过多组统计求平均值的方法得出盐水冰密度约为 0.932 g/cm³。

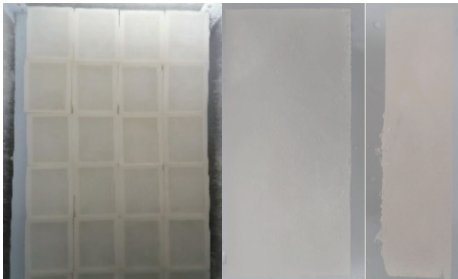


图 11 盐水冰试样的冻结过程

Fig. 11 Freezing process of saltwater ice specimen

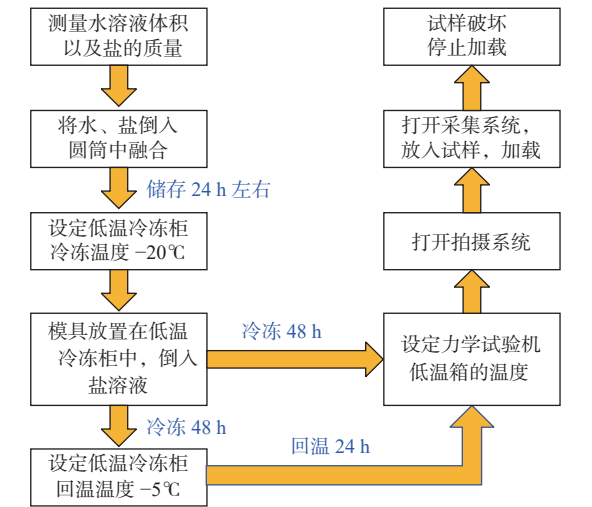


图 10 盐水冰的制作流程

Fig. 10 Fabrication process of saltwater ice

图 11 所示为冷冻温度为-20 ℃、冷冻时间为 48 h 的盐水冰试样, 可以看到冷冻之后的盐水冰体积膨胀率非常小, 形状比较规整, 无须进行后期处理。同时, 盐水冰试样中可观察的气泡分布相对均匀, 且分布非常明显, 不像淡水冰气泡区主要集中于试样的中部。由于盐水冰试样表面比

图 12 所示为盐水冰压缩强度随应变速率的变化曲线: 当应变速率小于 $3.57\times10^{-4}\text{ s}^{-1}$ 时, 随着应变速率的增加, 盐水冰压缩强度也随之逐渐增加, 相较于淡水冰, 盐水冰的压缩强度与应变速率之间呈现出更好的线性关系; 在中等和高应变速率时, 盐水冰试样的压缩强度将随着应变速率的增加呈现出先减小后增加的趋势; 总体而言, 30‰ 盐度的盐水冰压缩强度将随着应变速率的增加而整体呈现出先增加后减小再增加的趋势, 这与淡水冰压缩强度随应变速率的变化规律(图 4)存在一定差异, 且盐水冰的压缩强度明显小于淡水冰, 尤其当加载速率 $v=0.1\text{ mm/min}$ ($\dot{\epsilon}=1.19\times10^{-5}\text{ s}^{-1}$) 时, 盐水冰和淡水冰的压缩强度分别为 0.409 MPa 和 1.73 MPa, 即淡水中加入盐后使冰的压缩强度减小了 76.4%。在整个应变速率范围内, 盐水冰的压缩强度变化范围为 0.386~1.37 MPa, 仍高于冰-桨接触试验的目标压缩强度 160~300 kPa。

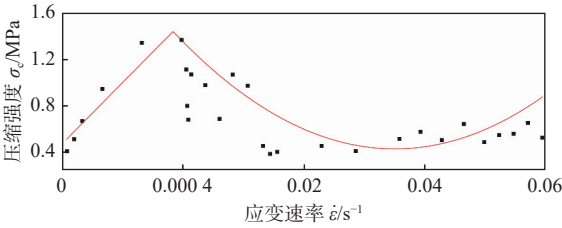


图 12 盐水冰压缩强度随应变速率的变化曲线
Fig. 12 Variation curve of compressive strength of saltwater ice with strain rates

图 13 所示为不同应变速率下的盐水冰应力-应变曲线。由图 13(a)可知,随着应变的增加,应力将不断增加到某峰值后逐渐下降,且随着加载速率的不断增大,其峰值也不断增大,但总体变化较平缓,应力-应变曲线呈现出典型的蠕变破坏特征;随着应变的增加,韧性破坏的特征将逐渐显现。在图 13(b)中,在加载至中等应变速率过程中,应力将随着应变的增加而增加,但应力到达峰值后会突然跌落,其变化趋势非常明显,应力-应变曲线均呈现脆性破坏特征。在图 13(c)中的高应变速率范围内,曲线未展示出蠕变破坏和脆性破坏特征,应力在上升过程中符合韧性破坏,即先缓慢增加而后迅速增加,但应力在峰值之后将缓慢减小。

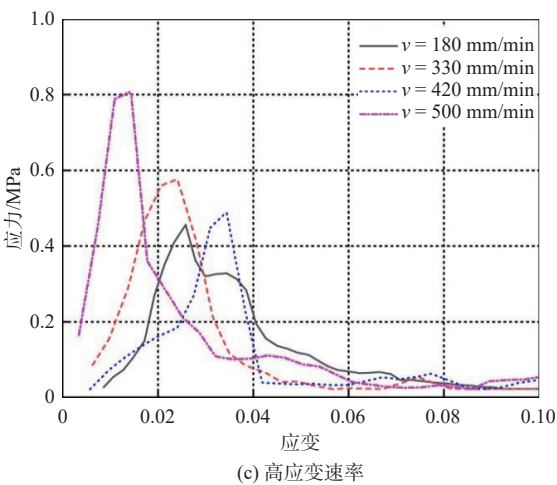
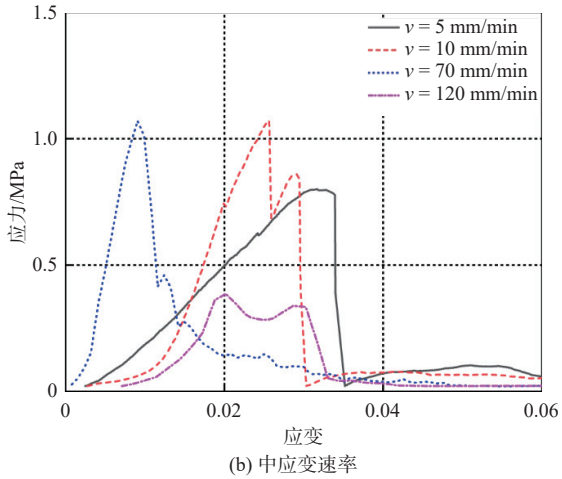
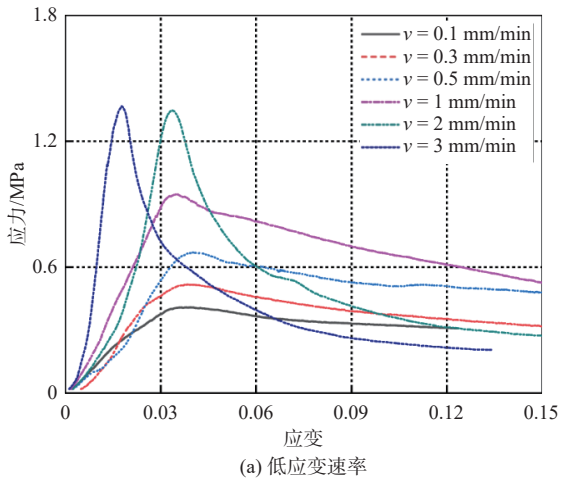


图 13 不同加载速率时的盐水冰应力-应变曲线
Fig. 13 Stress-strain curves of saltwater ice at different loading rates

图 14 所示为不同加载速率时盐水冰试样的破坏模式。由图 14(a)可知,当加载速率较小时 ($v=0.1$ mm/min), 盐水冰试样仅在底部出现略微膨胀的形式,但冰块整体未发生膨胀形式破坏;随着加载速率的增加 ($v=0.5, 2$ mm/min), 试样底部和中部的膨胀较为明显,且发生了膨胀形式破坏;当加载速率增加至 $v=3$ mm/min 时,试样内部的裂纹数量增加,但试样未发生断裂,仍然保留了整体性。在中等加载速率时,如图 14(b)所示,盐水冰试样主要发生剪切破坏,且剪切位置主要位于试样中部附近。而在图 14(c)的高加载速率下,主要存在劈裂破坏和剪切破坏这 2 种形式的破坏,并未出现图 9 中淡水冰试样的碎裂破坏。

2) 冷冻温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$,回温温度为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

由上文可知,盐水冰的冷冻温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$,冷冻时间为 48 h 时,在整个应变速率范围内,盐水冰的压缩强度在 $0.386\sim 1.37\text{ MPa}$ 范围内变化,明显高于目标压缩强度 $160\sim 300\text{ kPa}$,因此,为了降低盐水冰的压缩强度,可对冷冻后的盐水冰试样进行回温处理,回温温度为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$,回温时间为 24 h ,具体的制作流程如图 10 所示,回温后的盐水冰试样如图 15 所示,可见回温后的盐水冰试样内部气泡明显少,且盐水冰试样内部的紧密程度有所降低。

图 16 所示为回温盐水冰的压缩强度随应变速率的增加而减小的变化曲线,其数据的离散程度小于淡水冰和盐水冰,且与直接冷冻的盐水冰压缩强度的变化趋势也存在一定差异。图 16 中,回温后盐水冰的压缩强度整体变化范围为 $77\sim 356\text{ kPa}$,与目标压缩强度 $160\sim 300\text{ kPa}$ 较为接近,因此,冷冻温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$,冷冻时间为 48 h ,回温温度为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$,回温时间为 24 h 的盐水冰可以满足模型试验要求。

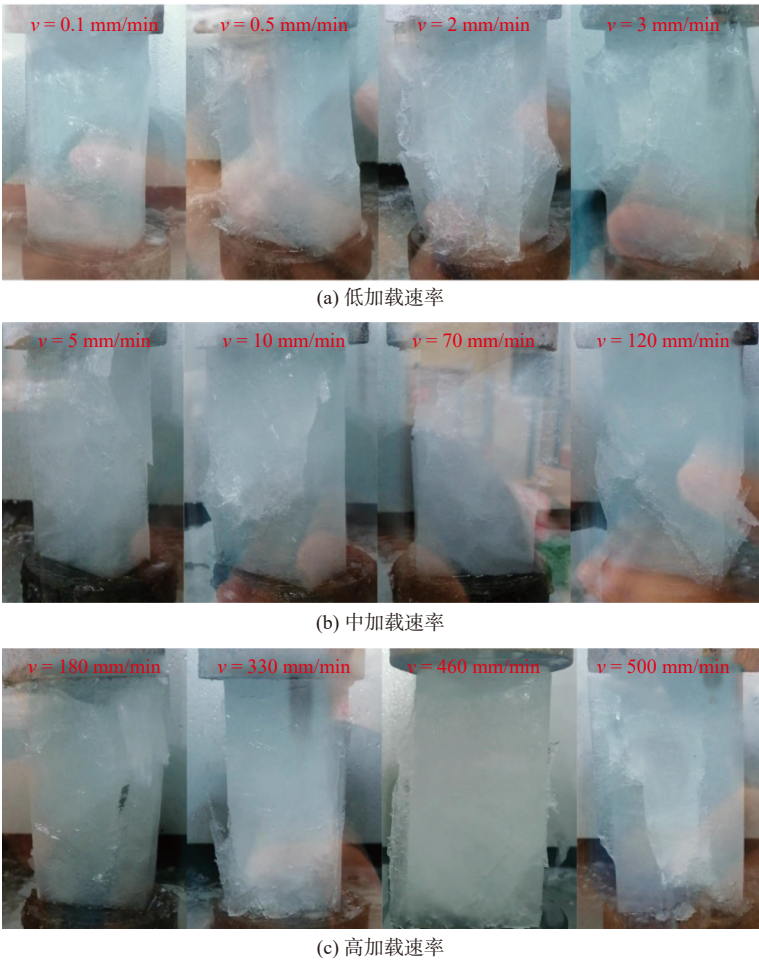


图 14 不同加载速率时盐水冰试样的破坏模式

Fig. 14 Failure modes of saltwater ice specimens at different loading rates



图 15 回温后的盐水冰试样

Fig. 15 Saltwater ice specimens after tempering

图 17 所示为低、中、高加载速率下，回温后盐水冰的应力-应变曲线。由图 17(a)可知，在低加载速率($v=0.1, 0.5, 2, 4 \text{ mm/min}$)时，随着压头的运动，模型冰的应变将以恒定速率增长。在最初阶段，由于试样端部存在碎冰屑、试验机压头与试样未完全接触等原因，应力-应变曲线存在一个非线性增长阶段；然后，在达到应力最大值之前出现一个直线段，该直线段体现了冰试样承载的线性变形，这是计算冰弹性模量的依据；在此之

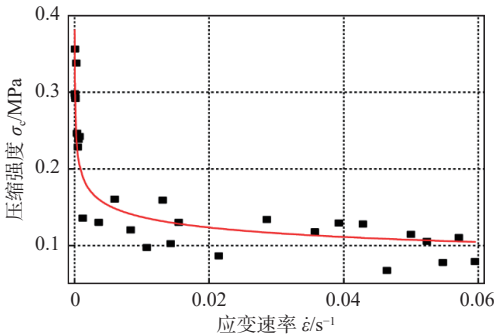
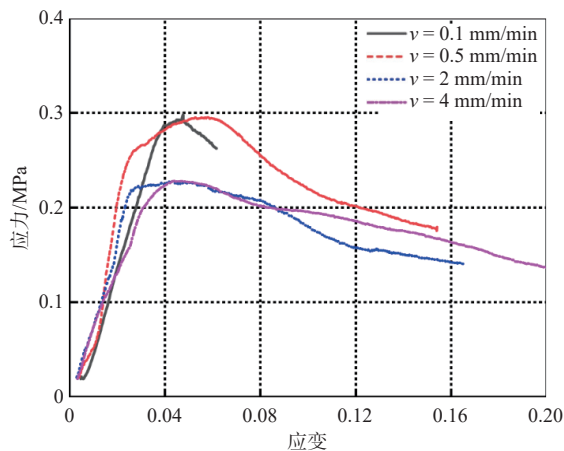


图 16 回温后盐水冰的压缩强度随应变速率的变化曲线

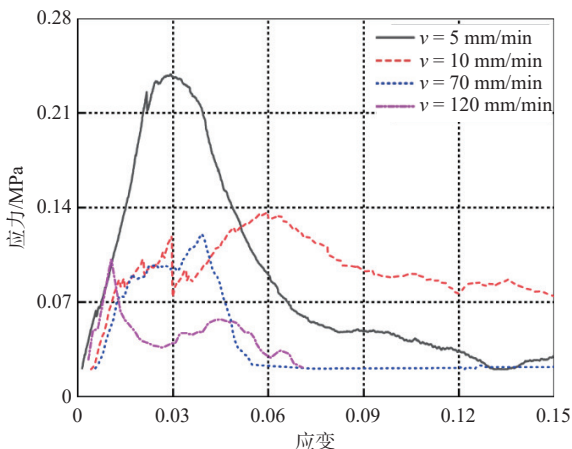
Fig. 16 Variation curve of compressive strength of saltwater ice after tempering with strain rate

后，冰块开始屈服，应力逐渐过渡到最大值并开始下降，而变形则进一步增加。模型冰试样在 4 种低加载速率状态下都经历了屈服和应变软化阶段之后发生的韧性破坏，故在应力-应变曲线中均表现出了韧性性质。

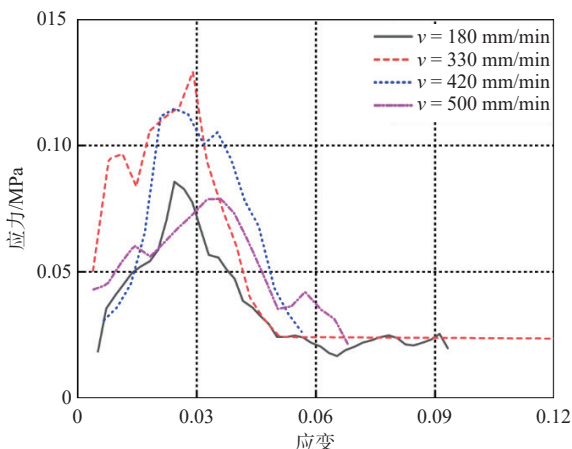
图 17(b)的应力-应变曲线中，在中等加载速率($v=5, 10 \text{ mm/min}$)时，随着加载过程的不断持续，应力迅速增加至一定峰值后将迅速下降至峰值的 5.8% 和 38.1% ($v=5, 10 \text{ mm/min}$)，然后增加至第 2 个峰值，其相较于第 1 个峰值分别增加了



(a) 低加载速率



(b) 中等加载速率



(c) 高加载速率

图 17 不同应变速率时回温后盐水冰的应力-应变曲线

Fig. 17 Stress-strain curves of saltwater ice-tempering at different loading rates

5.8% 和 13.8% ($v=5, 10$ mm/min), 最后将持续下降直至试样发生完全破坏, 其符合脆性与韧性行为之间过渡的破坏模式。当加载速率 $v=70$ mm/min 和 120 mm/min 时, 随着加载过程的不断持续, 应力将迅速增加到一定值后突然跌落, 应力-应变曲线均呈现脆性破坏的典型应力-应变曲线形式。

在图 17(c) 中, 高加载速率范围内的应力-应变曲线未展示出蠕变破坏、韧性破坏、韧脆转变以

及脆性破坏的特征, 其与未回温时盐水冰的变化趋势相同。

图 18 所示为不同加载速率时回温后盐水冰试样的破坏模式, 在初始阶段, 盐水冰试样呈现侧向鼓胀破坏, 其裂缝较短, 无明显的主裂缝; 随着加载速度的增加, 试样内部的裂纹数量增加, 其膨胀的范围也随之扩大; 在中、高加载速率时, 盐水冰试样主要呈现未为剪切形式破坏, 且其顶部产生了裂纹。

此外, 以加载速率 $v=0.5, 2, 4, 6, 10, 70, 120, 330$ mm/min 为例, 分别对比有、无回温时不同加载速率下盐水冰试样的压缩强度以及应力-应变的变化曲线, 结果如图 19~图 20 所示。

图 19 可知, 在整个加载速率范围内, 回温后盐水冰试样的压缩强度明显小于未回温时的盐水冰试样, 尤其当加载速率较小时 ($v=0.5$ mm/min), 回温后试样的压缩强度仅为 0.295 MPa, 而未回温试样则为 0.671 MPa, 即回温使冰试样的压缩强度减小为原来的 0.44 倍, 可见回温对盐水冰试样的压缩强度存在较明显的影响。

图 20 以加载速率 $v=4$ mm/min 为例, 对比未回温与回温后条件下的盐水冰试样应力-应变曲线, 可见回温减缓了盐水冰试样应力-应变曲线的上升和下降过程, 且明显降低了其应力峰值。

图 21 所示为相同加载速率下未回温和回温时盐水冰试样的试验破坏模式对比结果, 由图 21 可知, 盐水冰试样未回温时的破坏模式均为剪切破坏, 而回温后的试样发生了韧性破坏和剪切破坏, 且剪切破坏时冰块的破碎程度更高。

2.3 尿素冰的试验结果分析

1979 年, 加拿大学者 Timco 通过分析在 40 种不同添加剂下所形成的冰试样, 研究出第 2 代模型冰—尿素冰。相较于盐水冰而言, 尿素冰具有无毒、强度和刚度性能突出等优点^[25]。当尿素冰的弯曲强度低于 20 kPa 时, 弹性模量 E 与弯曲强度 σ_f 的比值 E/σ_f 为 2 400, 且在整个弯曲强度范围内的 E/σ_f 基本均大于 2 000。由于 E/σ_f 在很大程度上反映了冰的脆性, 故尿素冰在这方面比盐水冰更有优势; 另外, 尿素冰的密度 (0.95 mg/m³) 高于盐水冰 (0.89 mg/m³)。然而, 当缩尺比超过 30 时, 尿素冰和盐水冰的抗压强度均无法很好地满足缩尺比要求, 其实际值低于所需值的 2~3 倍^[26-27]。

本文以浓度为 2.6% 的尿素溶液作为研究对象, 开展尿素冰在有、无回温工况下的单轴压缩试验研究, 其中尿素冰原料、尿素冰试样的冷冻及回温过程如图 22 所示。

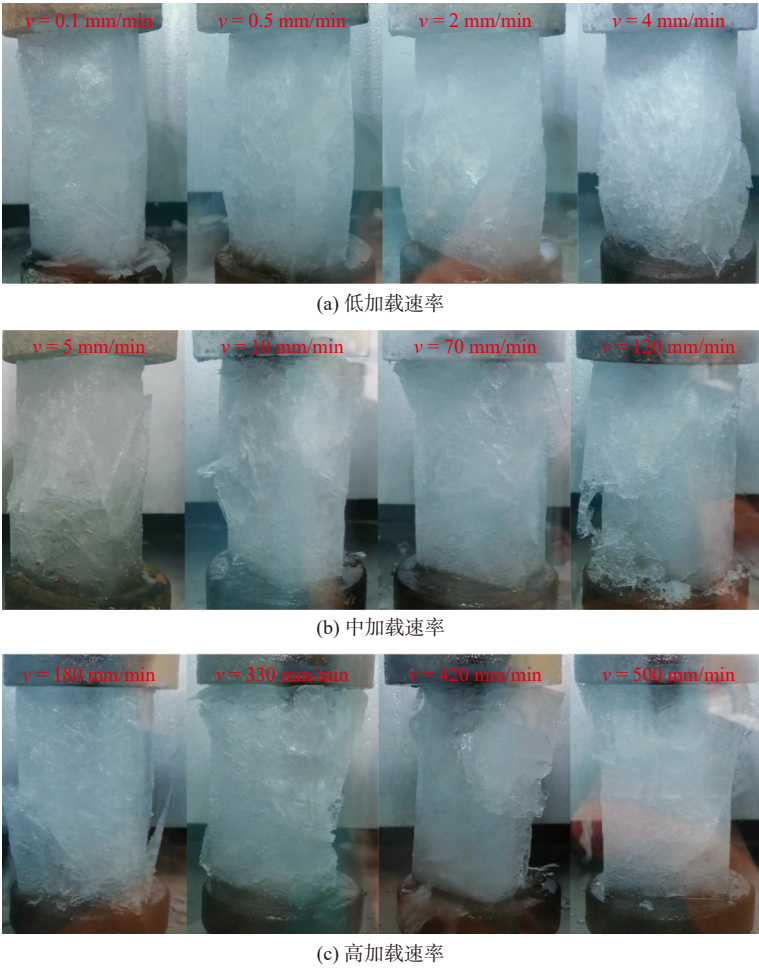


图 18 不同加载速率时回温后盐水冰试样的破坏模式

Fig. 18 Failure modes of saltwater ice-tempering specimen at different loading rates

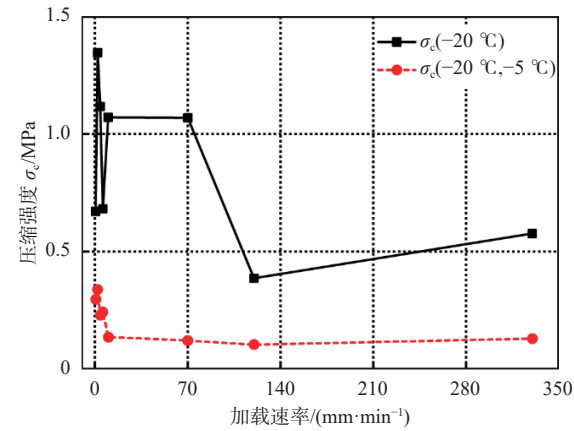


图 19 盐水冰冷冻与冷冻-回温时压缩强度对比曲线

Fig. 19 Comparison curves of compressive strength during saltwater ice freezing and freezing-tempering

图 23 所示为尿素冰在中等和高加载速率下的应力-应变曲线, 由图 23(a)可知, 当加载速率 $v=30\text{ mm/min}$ 时, 随着加载过程的不断持续, 应力将迅速增加到一定值后突然跌落, 其应力-应变曲线呈现脆性破坏的典型应力-应变曲线形式, 而在其他中等加载速率时, 应力突然跌落的趋势将逐渐减小, 该结果与图 5(b)中淡水冰的应力-应变曲线存在一定差异。同时, 与淡水冰相比,

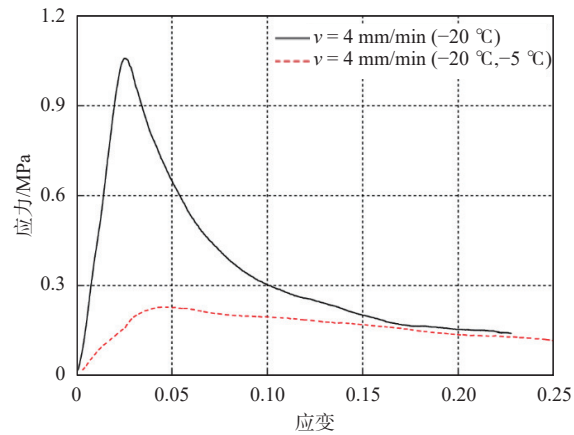


图 20 盐水冰冷冻与冷冻-回温时应力-应变对比曲线

Fig. 20 Comparison curves of stress-strain during saltwater ice freezing and freezing-tempering

尿素冰的应力峰值有所增加, 例如: 淡水冰试样在 $v=30, 70, 110, 180, 300\text{ mm/min}$ 时的应力分别为 2.32, 0.95, 1.34, 1.38, 0.93 MPa, 而尿素冰试样的应力则分别为 3.82, 1.52, 2.26, 1.77, 1.84 MPa。在图 23(b)中, 回温使尿素冰应力-应变曲线的变化形式产生差异, 特别是当加载速率 $v=30\text{ mm/min}$ 时, 出现由脆性破坏向韧性破坏的转变。

在图 24 中, 尿素冰未回温时的破坏模式主要

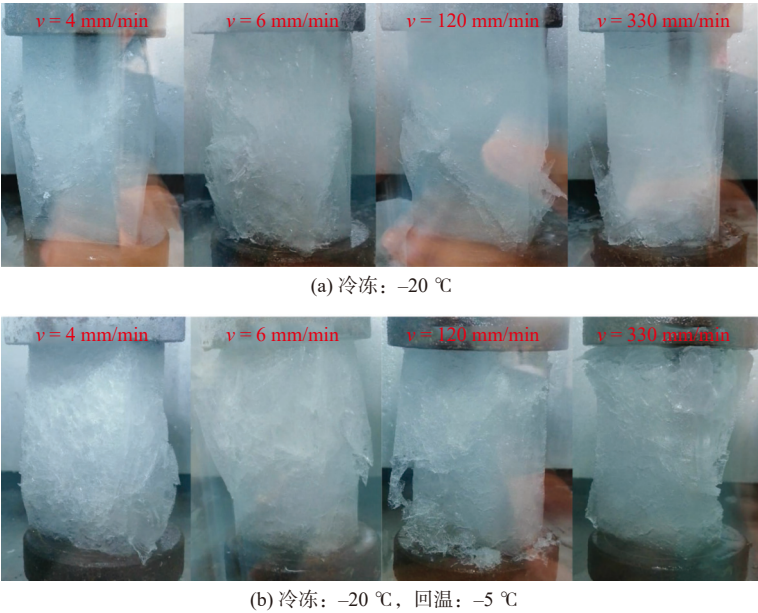


图 21 冷冻与冷冻-回温时盐水冰的破坏模式对比

Fig. 21 Comparison of saltwater ice failure modes during freezing and freezing-tempering



(a) 尿素冰原料 (b) 尿素冰试样(冷冻) (c) 尿素冰试样(回温)

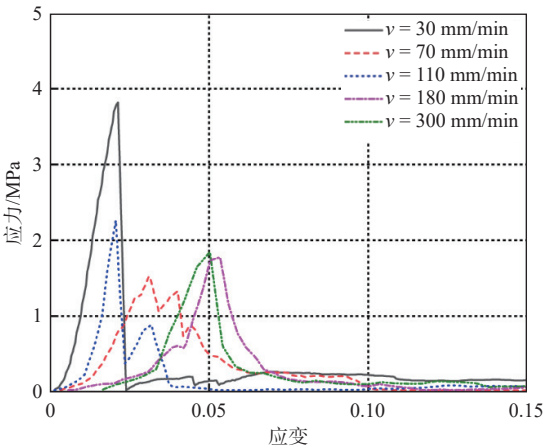
图 22 尿素冰的制作过程

Fig. 22 Fabrication process of urea ice

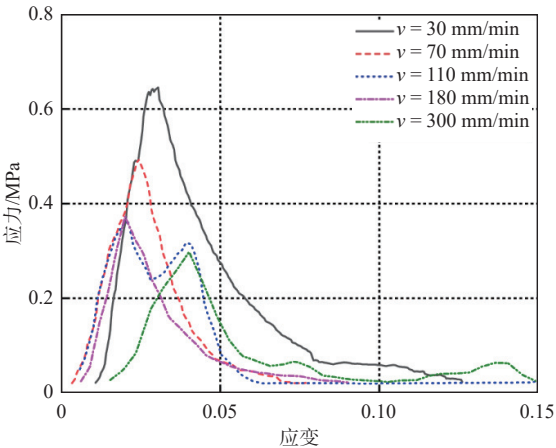
为劈裂破坏,而回温后的破坏模式则主要为剪切破坏。图 25 所示为尿素冰试样冷冻和冷冻-回温在不同加载速率下的压缩强度,可见回温后的尿素冰试样的压缩强度及波动均明显小于未回温工况,且未回温和回温后尿素冰试样的压缩强度均高于目标压缩强度 160~300 kPa,故尿素冰不适用于开展冰-螺旋桨的接触试验研究。

2.4 EG/AD/S 冰试验结果分析

1986 年, Timco 介绍了一种新型的模型冰, 其由混合乙二醇(EG)、脂肪族洗涤剂(AD)、糖(S)等 3 种不同添加剂的水溶液制成, 称为 EG/AD/S 冰, 这是第 3 代模型冰。EG/AD/S 模型冰是单层结构, 呈柱状且存在细密的纹理, 改善了之前模型冰在厚度范围内各层强度不相等的问题。在整个弯曲强度范围内, 该模型冰的 E/σ_f 为 1 500~2 500。虽然 EG/AD/S 模型冰相较于尿素冰的优势非常明显, 但其与自然海冰之间仍然存在一定差异。例如, EG/AD/S 模型冰在某些工况下的 E/σ_f 低于自然海冰(2 000~5 000), 其密度和断裂韧性也高于自然海冰^[28-29]。



(a) 冷冻时的应力-应变曲线 (-20 °C)



(b) 冷冻-回温时的应力-应变曲线 (-20 °C 和 -5 °C)

图 23 不同加载速率时的尿素冰应力-应变曲线

Fig. 23 Stress-strain curves of urea ice at different loading rates

根据文献[30]中 EG/AD/S 冰的配比数据, 本文以 99.459% 的淡水、0.46% 的乙二醇、0.032% 的脂肪族洗涤剂以及 0.049% 的糖作为原料来研制 EG/AD/S 冰, 进而开展有、无回温工况的对比试验,

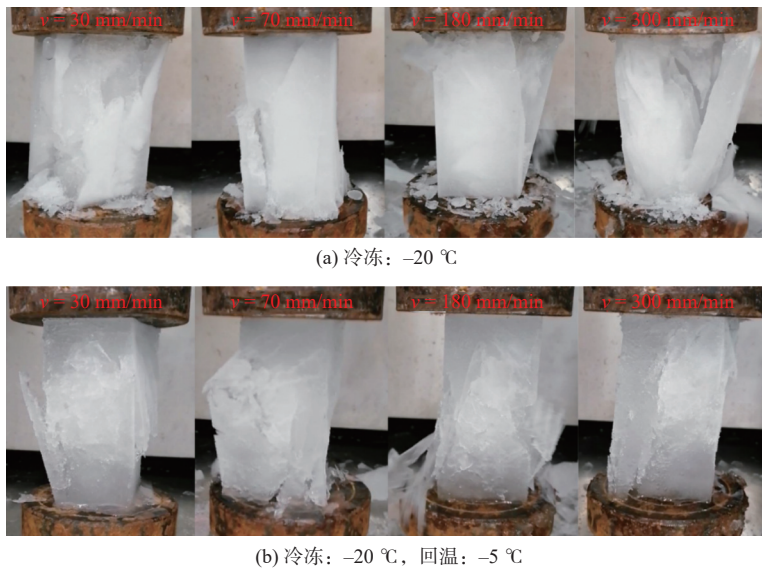


图 24 冷冻与冷冻-回温时尿素冰的破坏形式对比

Fig. 24 Comparison of failure modes of urea ice during freezing and freezing-tempering

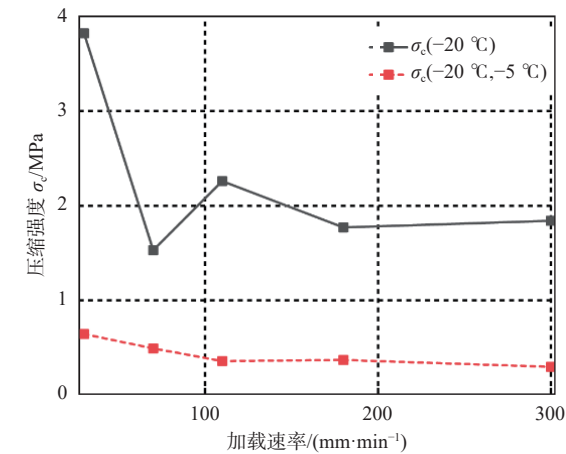


图 25 尿素冰试样有、无回温时的不同压缩强度对比

Fig. 25 Comparison of different compressive strengths in urea ice with or without tempering

其中 EG/AD/S 冰的制作过程如图 26 所示。

图 27 所示为 EG/AD/S 冰在中等和高加载速率时的应力-应变曲线。

由图 27(a)可知,加载速率 $v=30, 70, 110$ mm/min 时,应力将随着加载的持续而迅速增加到一定值后突然跌落(未降为 0),应力-应变曲线呈现了脆性破坏的典型应力-应变曲线形式,与图 5(b)中淡水冰应力-应变曲线的变化趋势相同。

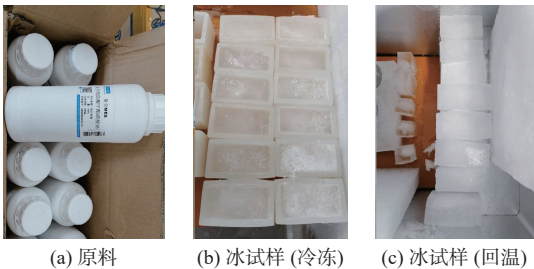
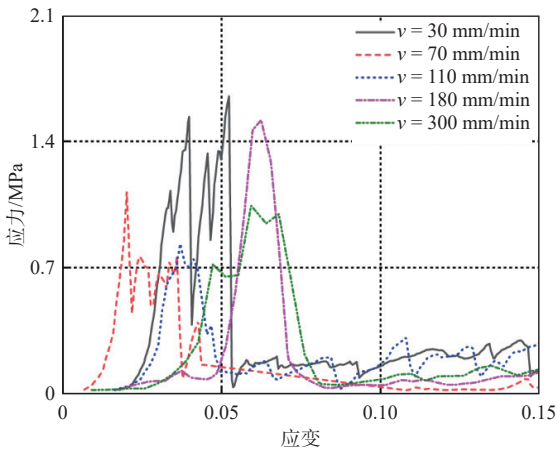
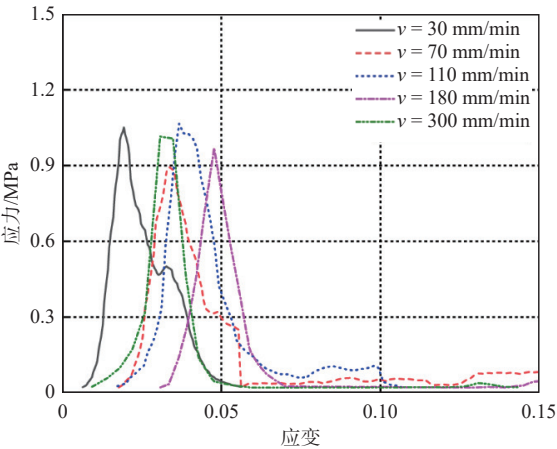


图 26 EG/AD/S 冰的制作过程

Fig. 26 The production process of EG/AD/S ice



(a) 冷冻时的应力-应变曲线 (-20 °C)



(b) 冷冻-回温时的应力-应变曲线 (-20 °C 和 -5 °C)

图 27 不同加载速率下的 EG/AD/S 冰应力-应变曲线

Fig. 27 Stress-strain curves of EG/AD/S ice at different loading rates

然而,与淡水冰相比,EG/AD/S 冰的应力峰值变化相对不明显,例如:淡水冰试样在加载速率 $v=30, 70, 110, 180, 300$ mm/min 时,其应力分别为 2.32, 0.95, 1.34, 1.38, 0.93 MPa,而 EG/AD/S 冰试样的应

力分别为 1.65, 1.12, 0.83, 1.52, 1.04 MPa, 其主要原因是 EG/AD/S 冰中的淡水成分为 99.459%。

在图 27(b)中, 回温使 EG/AD/S 冰的应力-时间曲线的变化形式产生了差异, 其破坏形式由脆

性破坏向韧性破坏转变。
根据图 28 的冰破坏模式对比结果, EG/AD/S 冰未回温时主要为劈裂破坏和碎裂破坏, 而回温后则主要为劈裂破坏。

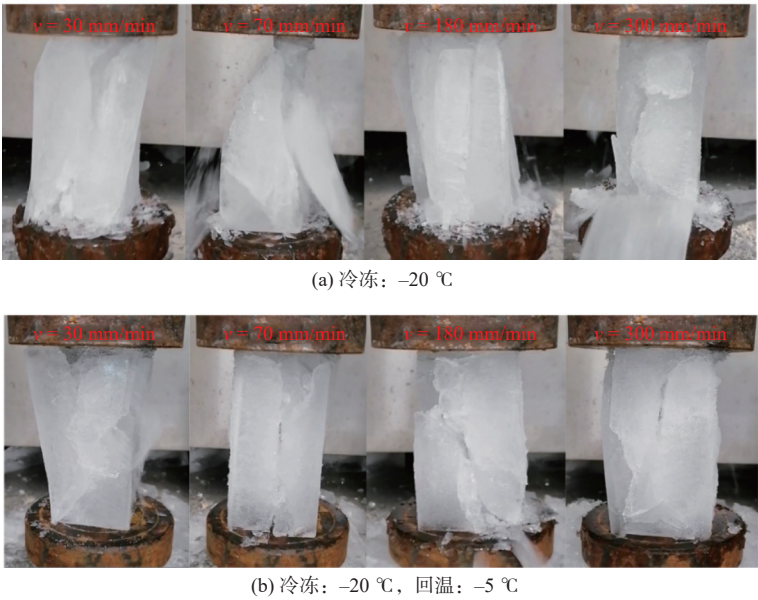


图 28 冷冻与冷冻-回温时 EG/AD/S 冰破坏形式对比

Fig. 28 Comparison of EG/AD/S ice failure modes during freezing and freezing-tempering

图 29 所示为 EG/AD/S 冰冷冻和冷冻-回温时在不同加载速率下的压缩强度, 由图 29 可知, 在加载速率变换的全过程中, 回温后 EG/AD/S 冰的压缩强度及波动均小于未回温工况(减幅较小), 但未回温和回温后 EG/AD/S 的压缩强度均高于目标压缩强度 160~300 kPa, 故 EG/AD/S 冰也不适用于开展冰-螺旋桨的接触试验研究。

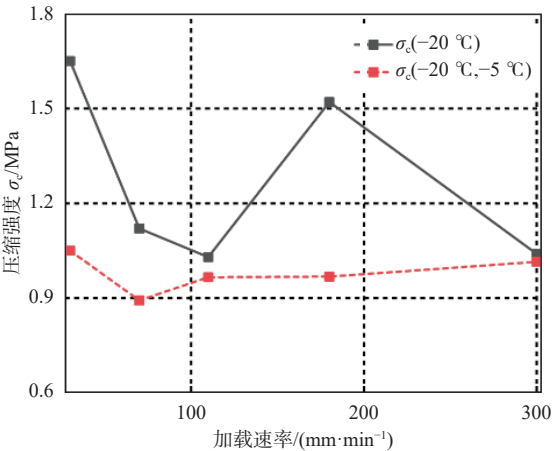


图 29 EG/AD/S 冰有、无回温时的不同压缩强度对比
Fig. 29 Comparison of different compressive strengths in EG/AD/S ice with or without tempering

2.5 混合石蜡模型冰试验结果分析

石蜡具有密度与冰接近、熔点低、结晶过程操作简便且易于控制、不溶于水、无污染等优点, 故广泛应用于冰区航行船舶的模型试验^[31]。本文以

58#半精炼颗粒状石蜡为原料, 首先采用电炉加热的方式融化颗粒状石蜡, 然后将融化后的溶液倒入模具中, 经冷却成型、切割完成后去除模型冰的边缘毛刺, 即可获得 140 mm×70 mm×35 mm 的石蜡模型冰试样, 如图 30 所示。



图 30 石蜡模型冰
Fig. 30 Paraffin model ice

根据数据统计结果, 石蜡模型冰的压缩强度可分为 2 个部分。在低加载速率 0.1~6 mm/min 时, 对应了 $1.19\times10^{-5}\sim4.76\times10^{-4}\text{ s}^{-1}$ 的应变率, 石蜡模型冰的压缩强度和应变速率变化曲线如图 31 所示。当应变速率 $\dot{\epsilon}<7.14\times10^{-4}\text{ s}^{-1}$ 时, 随着应变速率的增加, 其压缩强度也随之逐渐增加, 且为幂指数分布; 而当应变速率 $7.14\times10^{-4}\text{ s}^{-1}<\dot{\epsilon}<5.95\times10^{-2}\text{ s}^{-1}$ 时, 随着应变速率的增加, 石蜡模型冰的压缩强度呈线性增加的趋势。

图 32 所示为石蜡模型冰在不同加载速率下的应力-应变曲线。

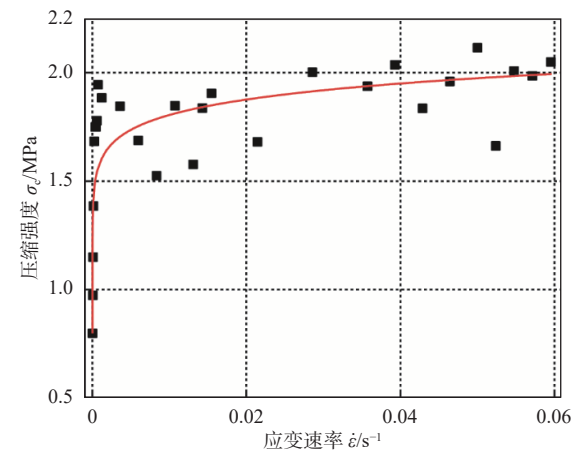


图 31 石蜡模型冰压缩强度随应变速率的变化曲线

Fig. 31 Variation curve of compressive strength of paraffin model ice with strain rate

图 32(a) 的应力-应变曲线符合蠕变破坏时应力-应变曲线的典型特征。如图 32(b) 所示, 在中等加载速率下, 例如 $v=10\text{ mm/min}$ 时, 随着加载过程的不断持续, 应力将迅速增加至一定值后突然跌落, 此时石蜡模型冰试样将发生脆性破坏; 尔后加载速率将继续增加, 而应力-应变曲线则不再出现明显的变化特征。

由图 33 冰试样的破坏模式可知, 在低加载速率时, 石蜡模型冰的破坏模式主要为 S 型的蠕变破坏;

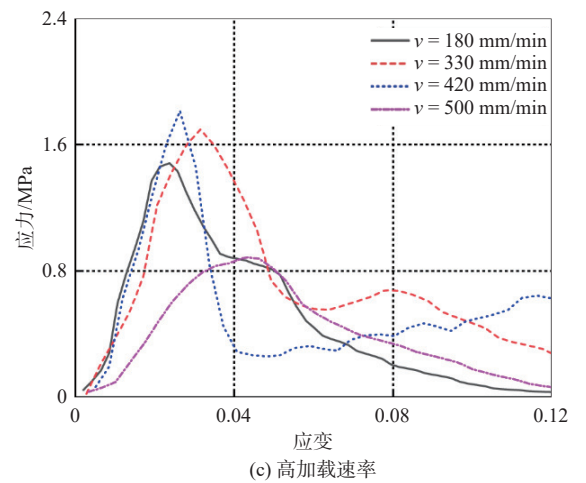
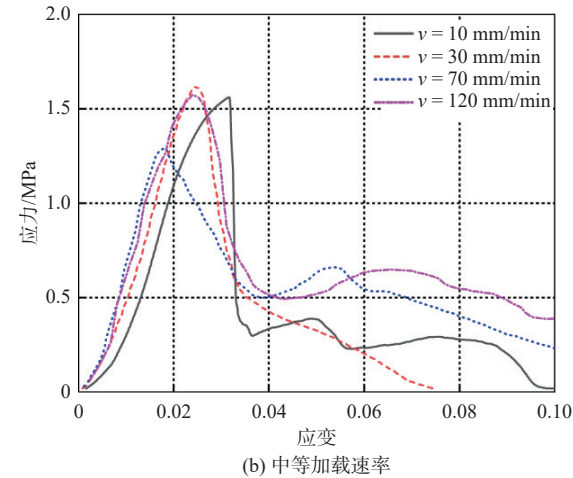
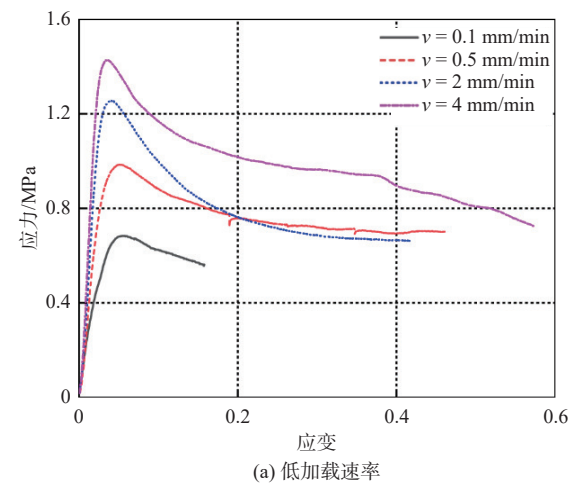


图 32 不同加载速率时石蜡模型冰的应力-应变曲线

Fig. 32 Stress-strain curves of paraffin model ice at different loading rates

在中等和高加载速率时, 其破坏模式存在剪切破坏和劈裂破坏, 但随应变速率的变化规律不明显。

不同材质模型冰的压缩强度数据如表 1 所示, 其强度由大到小的顺序依次为尿素冰、淡水冰、EG/AD/S 冰、石蜡模型冰、淡水冰-回温、EG/AD/S 冰回温、盐水冰、尿素冰-回温及盐水冰-回温。

3 结 论

本文通过开展淡水冰、淡水冰-回温、盐水冰、盐水冰-回温、尿素冰、尿素冰-回温、EG/AD/S 冰、EG/AD/S 冰-回温以及石蜡模型冰的单轴压缩试验, 对比分析了冻结模型冰和非冻结模型冰的压缩强度、应力-应变以及冰的破坏形式, 主要结论如下:

- 1) 在淡水冰试样压缩试验中, 随着应变速率的增加, 淡水冰的压缩强度呈现出先增加后减小的趋势, 其破坏形式呈现了膨胀形式破坏——劈裂形式破坏——碎裂形式破坏的转变过程。
- 2) 在盐水冰试样压缩试验中, 随着应变速率的增加, 盐水冰的压缩强度呈现出先增加后减小再增加的趋势, 其破坏形式呈现了膨胀形式破坏——剪切形式破坏——劈裂形式破坏的转变过程。在盐水冰的研制过程中, 采用冷冻温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 冷冻时间为 48 h , 回温温度为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 冷冻时间为 24 h 的流程制作的盐水冰可以满足冰浆接触试验的要求。
- 3) 在石蜡模型冰试样压缩试验中, 随着应变速率的增加, 石蜡模型冰的压缩强度呈现出先迅速增加后缓慢增加的趋势, 其破坏形式呈现了由 S 型膨胀形式破坏向剪切形式破坏、劈裂形式破坏的转变过程。
- 4) 根据相同应变速率下冻结模型冰和非冻

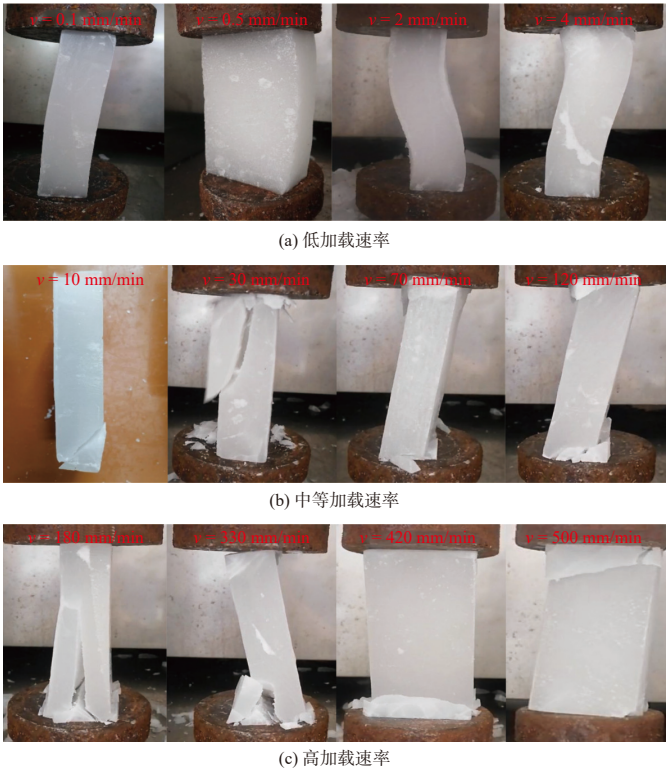


图 33 不同加载速率时石蜡模型冰试样的破坏模式

Fig. 33 Failure modes of paraffin model ice specimens at different loading rates

表 1 冻结模型冰和非冻结模型冰的压缩强度对比

Table 1 Comparison of compressive strength between frozen model ice and non-frozen model ice

类型	压缩强度/MPa				
	v=30 mm/min	v=70 mm/min	v=110 mm/min	v=180 mm/min	v=300 mm/min
淡水冰	2.320	1.550	1.340	1.380	0.920
淡水冰-回温	1.210	1.010	1.180	1.200	0.850
盐水冰	0.982	1.070	0.453	0.456	0.516
盐水冰-回温	0.130	0.120	0.159	0.131	0.117
尿素冰	3.820	1.530	2.260	1.770	1.840
尿素冰-回温	0.645	0.494	0.360	0.372	0.298
EG/AD/S冰	1.650	1.120	1.520	1.040	1.050
EG/AD/S冰-回温	1.050	0.893	0.966	0.968	1.015
石蜡模型冰	1.850	1.520	1.580	1.680	1.940

结模型冰的压缩强度对比结果,由大到小的顺序依次为尿素冰、淡水冰、EG/AD/S冰、石蜡模型冰、淡水冰-回温、EG/AD/S冰-回温、盐水冰、尿素冰-回温及盐水冰-回温。

根据本文的初步探究结果,盐水冰可以满足螺旋桨模型比尺和冰力学特性相似准则,与单独使用非冻结模型冰相比,更符合实际场景下冰区螺旋桨与海冰的相互作用工况,从而增加了试验测试结果的可行性和适用性;通过回温和改变盐度的方式来降低冻结冰的压缩强度,为探究常规环境下冻结模型冰的研制提供了新的方向。由于本文以现有的2种不同直径的螺旋桨进行缩尺,故其研制的盐水冰存在一定局限性,后期将针对

多种尺度的螺旋桨研制其对应的盐水冰,进而开展盐水冰的弯曲强度、弹性模型以及晶体结构测试等试验,以进一步提高试验测试结果的适用性和可靠性。

参考文献:

[1] HAWKES I, MELLOR M. Deformation and fracture of ice under uniaxial stress[J]. *Journal of Glaciology*, 1972, 11(61): 103-131.

[2] HOOKE R L, MELLOR M, BUDD W F, et al. Mechanical properties of polycrystalline ice: An assessment of current knowledge and priorities for research: report prepared for the international commission on snow and ice, with support from the U. S. national science foundation

[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 1980, 3(4): 263–275.

[3] TIMCO G W, FREDERKING R M W. Comparative strengths of fresh water ice[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 1982, 6(1): 21–27.

[4] MELLOR M, COLE D M. Stress/strain/time relations for ice under uniaxial compression[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 1983, 6(3): 207–230.

[5] SCHULSON E M, CANNON N P. The effect of grain size on the compressive strength of ice [C]// Proceedings of the IAHR Symposium on Ice. Hamburg, Germany: [s. n.], 1984.

[6] JONES S J, GAGNON R E, DERRADJI A, et al. Compressive strength of iceberg ice[J]. *Canadian Journal of Physics*, 2003, 81(1/2): 191–200.

[7] MOORES C, VEITCH B, BOSE N, et al. Effects of strain-rate and temperature on the uniaxial compressive strength of EG/AD/S CD model ice[C]//16th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC'01). Ottawa, Canada: POAC, 2001.

[8] 李志军, RISKAK. 细粒酒精模型冰单轴压缩强度特征试验研究 [J]. 冰川冻土, 1998, 20(2): 71–75.

LI Z J, RISKAK. Experimental study on the uniaxial compressive strength characteristics of fine grain ethanol model ice[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1998, 20(2): 71–75 (in Chinese).

[9] 田于逵, 季少鹏, 寇莹, 等. 中国船舶科学研究中心小型冰水池柱状盐水模型冰单轴压缩强度分析 [J]. 船舶力学, 2020, 24(12): 1647–1656.

TIAN Y K, JI S P, KOU Y, et al. Characterization of uniaxial compression strength for columnar saline model ice in CSSRC small ice model basin[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2020, 24(12): 1647–1656 (in Chinese).

[10] 刚旭皓, 田于逵, 余朝歌, 等. 盐水柱状模型冰弯曲强度数值计算分析 [J]. *中国舰船研究*, 2021, 16(5): 143–149.

GANG X H, TIAN Y K, YU Z G, et al. Numerical simulation analysis of flexural strength of columnar saline ice model[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2021, 16(5): 143–149 (in Chinese).

[11] 沈乐天, 赵士达, 卢锡年, 等. 天然淡水冰单轴压缩强度及其温度和应变率效应 [J]. 冰川冻土, 1990, 12(2): 141–146.

SHEN L T, ZHAO S D, LU X N, et al. Effects of temperature and strain rate on uniaxial compressive strength of natural fresh water ice[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1990, 12(2): 141–146 (in Chinese).

[12] 罗天一, 宋轶充, 张丽敏, 等. 人工淡水冰的单轴压缩强度试验技术 [J]. 工程与试验, 2008, 48(4): 24–26, 38.

LUO T Y, SONG Y C, ZHANG L M, et al. Test technology of uniaxial compressive strength of artificial freshwater ice[J]. *Engineering & Test*, 2008, 48(4): 24–26, 38 (in Chinese).

[13] 周庆. 淡水冰单轴压缩强度试验研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2013.

ZHOU Q. Experimental study on uniaxial compressive strength of fresh water ice[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013 (in Chinese).

[14] 张丽敏. 冰单轴压缩强度与影响因素试验研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2012.

ZHANG L M. Experimental study on uniaxial compressive strength of ice and influence factors[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012 (in Chinese).

[15] 韩红卫. 极区航道海冰时空分布及其物理力学性质研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2016.

HAN H W. Study on the spatial and temporal distribution of sea ice and the physical, mechanical properties of sea ice in polar routes[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016 (in Chinese).

[16] WANG Q K, LI Z J, LEI R B, et al. Estimation of the uniaxial compressive strength of Arctic sea ice during melt season[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2018, 151: 9–18.

[17] 陈晓东. 海冰与海水间热力作用过程及海冰单轴压缩强度特性的试验研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2019.

CHEN X D. Experimental study on sea ice-water thermodynamic process and characteristics of sea ice uniaxial compressive strength[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019 (in Chinese).

[18] 王永学, 李志军, 李广伟. 非冻结合成模型冰物理模拟冰作用力的试验技术 [J]. 冰川冻土, 2003, 25(Supp 2): 227–233.

WANG Y X, LI Z J, LI G W. Ice force modeling technique with non-refrigerated breakable ice material[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(Supp 2): 227–233 (in Chinese).

[19] 田育丰, 黄焱. 一种制备非冻结模型冰的人工引晶方法: 中国, 201910957145.3[P]. 2022-02-01.

TIAN Y F, HUANG Y. A kind of artificial crystal induction method for preparing non-freezing model ice: CN, 201910957145.3[P]. 2022-02-01 (in Chinese).

[20] 冯国庆, 刘剑飞, 孙雨薇, 等. 一种非冻结可破碎合成模型冰材料及其制备方法: 中国, 202010572020.1[P]. 2022-04-05.

FENG G Q, LIU J F, SUN Y W, et al. A non-freezing breakable synthetic model ice material and its preparation method: CN, 202010572020.1[P]. 2022-04-05 (in Chinese).

[21] International Towing Tank Conference. ITTC recommended procedures and guidelines, test methods for model ice properties: ITTC-2017 7.5-02-04-02[S]. [S. l.]: ITTC, 2017.

[22] ZUFELT J E, ETTEMA R. Model ice properties[R]. Spring-field: National Technical Information Service (NTIS), 1996: 3-4.

- [23] VROEGRIJK E A J. Ice breaking numerics[R]. Delft: Delft University of Technology, 2011.
- [24] 吴德星, 牟林, 李强, 等. 渤海盐度长期变化特征及可能的主导因素[J]. *自然科学进展*, 2004, 14(2): 191–195.
WU D X, MOU L, LI Q, et al. Characteristics and possible dominant factors of long-term salinity change in the Bohai Sea[J]. *Progress in Natural Science*, 2004, 14(2): 191–195 (in Chinese).
- [25] TIMCO G. The mechanical and morphological properties of doped ice: a search for a better structurally simulated ice for model test basins[C]//The Fifth International Conference on Port and Ocean Engineering Under Arctic Conditions. Trondheim: Norwegian Institute of Technology, 1980.
- [26] TIMCO G W. The mechanical properties of saline-doped and carbamide (urea)-doped model ice[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 1980, 3(1): 45–56.
- [27] HIRAYAMA K. Properties of urea-doped ice in the CRREL test basin[R]. Hanover: US Army Corps of Engineers, Cold Regions Research & Engineering Laboratory, 1983.
- [28] TIMCO G W. EG/AD/S: a new type of model ice for refrigerated towing tanks[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 1986, 12(2): 175–195.
- [29] SPENCER D, TIMCO G W. CD model ice-A process to produce correct density (CD) model ice[C]//10th International Symposium on Ice. Espoo, Finland: National Research Council Canada, 1990.
- [30] CHO S R, LEE C J, JEONG S Y. An efficient EG/AD model ice for the MOERI ice tank[C]//Proceedings of the Twentieth International Offshore and Polar Engineering Conference. Beijing, China: ISOPE, 2010.
- [31] LUO W Z, GUO C Y, WU T C, et al. Experimental research on resistance and motion attitude variation of ship-wave-ice interaction in marginal ice zones[J]. *Marine Structures*, 2018, 58: 399–415.

Experimental study on uniaxial compressive strength characteristics of conventional model ice in tank

XU Pei^{1,2}, LI Longhui², WANG Chao^{*3}

1 School of Ocean Engineering, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China

2 Makarov College of Marine Engineering, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China

3 College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

Abstract: [**Objective**] In the ice-propeller milling or collision test, in order to accurately test the ice load of the propeller, it is very important to use model ice which satisfies similarity with the geometric and mechanical properties of real ice. [**Methods**] Uniaxial compression tests of model ice using different materials are carried out with freshwater ice, saltwater ice, urea ice, ethylene glycol/aliphatic detergent/sugar (EG/AD/S) ice and paraffin model ice as the research objects. The compressive strength and failure modes of ice under different strain rates, freezing and tempering conditions are then tested and analyzed. [**Results**] In its development process, saltwater ice made with a freezing temperature and time of -20°C and 48 h, and tempering temperature and time of -5°C and 24 h, can meet the requirements of the ice-propeller contact test. The order of the compressive strength of the model ice in descending order is urea ice, freshwater ice, EG/AD/S ice, paraffin model ice, freshwater ice-tempering, EG/AD/S ice-tempering, saltwater ice, urea ice-tempering and saltwater-tempering. [**Conclusion**] The results of this study can provide useful references for the selection of model ice in subsequent ice-propeller milling or collision experiments.

Key words: freshwater ice; saltwater ice; uniaxial compression strength; ice-propeller test; ship propellers; iceformation; compression strength