

文章编号: 1007-7294(2026)05-0791-13

模型冰的挤压破坏力学行为研究

张大勇^{1,2}, 李越鹏¹, 黄亚婷³, 吴宽宽¹, 李 伟⁴, 王国军¹

(1. 大连理工大学 化工海洋与生命学院, 辽宁 盘锦 124221; 2. 大连理工大学 宁波研究院, 浙江 宁波 315000; 3. 中国第一汽车股份有限公司, 长春 130000; 4. 中海油研究总院有限责任公司 北京 100010)

摘要: 模型实验是冰与结构相互作用研究的重要手段, 不同的冰-水池实验室和冰压痕试验中采用的模型冰(包括盐水冰、尿素冰和 EG/AD/S 冰等)存在差异, 研究不同模型冰的力学特征对开展模型实验至关重要。本文通过在低温实验室中制备上述三种模型冰, 开展单轴压缩试验, 对比分析了不同应变速率下模型冰宏观破坏特征, 基于 DIC (Digital Image Correlation) 技术, 详细分析模型冰全场应变和裂纹的发展过程, 最后分析模型冰力学性能的差异。结果表明: 盐水冰与海冰破坏行为最相似, 尿素冰高应变速率下具有分层破坏现象, EG/AD/S 模型冰更多地表现为韧性破坏特征, 三种模型冰具有不同的裂纹扩展特征, 盐水冰和尿素冰与海冰具有相近的韧性与脆性破坏区间。

关键词: 模型冰; 挤压破坏; DIC 技术; 单轴压缩试验; 力学行为

中图分类号: TB301 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1007-7294.2026.05.011

Mechanical behavior of model ice under crushing failure

ZHANG Da-yong^{1,2}, LI Yue-peng¹, HUANG Ya-ting³, WU Kuan-kuan¹, LI Wei⁴, WANG Guo-jun¹

(1. School of Ocean Science and Technology, Dalian University of Technology, Panjin 124221, China; 2. Ningbo Research Institute, Dalian University of Technology, Ningbo 315000, China; 3. FAW Group Co. Ltd., Changchun 130000, China; 4. CNOOC Research Institute Ltd., Beijing 100010, China)

Abstract: Model experiment is an essential approach for investigating ice-structure interaction. The model ice employed in different ice tank laboratories and ice indentation tests (including saline ice, urea ice, and EG/AD/S ice, etc.) exhibits variations, and studying the mechanical characteristics of various model ices is crucial for conducting model experiments. In this study, the aforementioned three types of model ice were prepared in a low-temperature laboratory, uniaxial compression tests were performed, and the macroscopic failure characteristics of the model ice under different strain rates were comparatively analyzed; based on the Digital Image Correlation (DIC), the full-field strain and crack propagation process of the model ice were analyzed in detail, and the differences in the mechanical properties of the model ice were ultimately examined. The results indicate that saline ice exhibits the most similar failure behavior to sea ice, urea ice presents layered failure at high strain rates, and EG/AD/S model ice demonstrates predominantly ductile failure characteristics; the three types of model ice exhibit distinct crack propagation characteristics, with

收稿日期: 2025-12-12

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFC2809104); 国家自然科学基金资助项目(52071055); 辽宁省自然科学基金联合基金(DUT24BS031)

作者简介: 张大勇(1978-), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: zhangdy@dlut.edu.cn;

王国军(1989-), 男, 博士, 助理研究员, 通讯作者, E-mail: wgj@dlut.edu.cn。

saline ice and urea ice possessing ductile and brittle failure intervals comparable to those of sea ice.

Key words: model ice; crushing failure; DIC; uniaxial compression test; mechanical behavior

0 引言

每年冬季,高纬度海域都会遭遇大范围结冰现象,海冰在风浪流耦合作用下发生漂移,与海洋结构物相互作用,易引起结构损伤和断裂^[1],制约高纬度海上资源开发。明确冰与结构相互作用的冰荷载是冰区海洋工程装备研发的关键,模型实验可弥补原型观测的缺陷,验证理论分析和数值模拟结果^[2],尤其针对大型海洋结构物开发维护的问题,模型实验是不可或缺的力学手段。

准确的相似理论体系是开展冰与结构相互作用模型实验的关键。Palmer 和 Johnston^[3]探讨了模型实验中的相似方程,明确了需同时满足傅汝德数相似与柯西相似。黄焱等^[4]基于上述相似准则开展了冰荷载相关模型试验。然而,海冰模型试验相似理论体系仍存在不足,海冰的力学行为与应变速率有关,结构动态响应对冰的破坏行为有显著影响。冰强度缩尺之后,不同应变速率下模型冰的断裂模式、裂纹扩展等力学行为与原型海冰存在差异^[5],导致冰力动态特征模拟失真,影响实验结果的准确性。明确不同模型冰破坏时的力学行为是提升冰激振动模型实验准确性的关键。

天然冰是一种力学性能特殊的材料,在不同的应变速率下,呈现不同的破坏模式;达到特定应变速率时,存在韧脆转变现象。陈晓东^[6]细化了海冰在单轴压缩下的破坏模式,应变速率突破 10^{-3} s^{-1} 阈值时发生碎裂和劈裂破坏,主要以碎裂为主; 10^{-3} s^{-1} 附近发生韧脆转变现象,破坏形式以劈裂为主;低于 10^{-3} s^{-1} 阈值时呈现多裂纹扩展的韧性破坏。刘禹博等^[7]探究粒状海冰压缩强度随应变速率、温度的变化情况。Zhang 等^[8]提出基于蒙特卡洛方法的海冰三维中尺度数值模型,研究海冰微观结构与宏观行为之间的关系。这些系统性的研究成果为建立天然冰力学模型奠定了重要理论基础。

目前,国内外各低温实验室常见的模型冰主要为盐水冰、尿素冰和乙二醇/脂肪族清洁剂/糖(Ethylene Glycol/Aliphatic Detergent/Sugar, EG/AD/S)冰。本文中乙二醇/脂肪族清洁剂/糖冰统一表述为 EG/AD/S 冰。不同的冻结添加剂对冰力学行为影响较大,世界各国实验室均投入了很大精力开展相关研究。田于逵等^[9]利用低浓度盐水溶液在小型冰水池内开展了柱状盐水冰的单轴压缩试验,主要分析了不同应变速率下柱状盐水冰单轴压缩强度的变化,同时观察到韧性、脆性、韧脆转变三种破坏模式及剪切、分裂的断裂现象。徐佩等^[10]开展淡水冰、盐水冰、尿素冰、EG/AD/S 冰以及石蜡模型冰的单轴压缩试验,详细对比了不同模型冰压缩强度的差异。Kim 等^[11]基于冰水池研究了 EG/AD/S 冰的弯曲强度和弹性模量。Huang 等^[12]使用尿素冰开展垂直桩上的模型冰试验,探究傅汝德-柯西相似律在冰破碎场景中的适用性问题。综合来看,现有的研究多聚焦于模型冰力学性能方面的相似性,对模型冰破坏行为的分析不明确。同时,现有研究多聚焦于单一模型冰,缺乏不同模型冰力学行为的系统性对比。

DIC (Digital Image Correlation) 技术通过对比试件表面变形前后的数字图像,可非接触式获取全场位移与应变分布,兼具高空间分辨率与动态追踪优势。Pan 等^[13]率先验证了 DIC 在冰体变形场测量中的适用性;Lian 等^[14]进一步将其应用于中等应变速率下天然湖冰的单轴压缩破坏模式研究;Wang 等^[15]通过 DIC 成功揭示了海冰各向异性特征对微裂纹扩展路径与破坏模式的调控机制。作为当前最先进的光学测量系统之一,DIC 技术显著提升了实验数据的可靠性,为深入揭示冰体破坏机理提供了不可或缺的研究手段。

本文通过制备柱状盐水冰、尿素冰和 EG/AD/S 冰,研究挤压破坏下三种模型冰的力学行为。基于模型冰单轴压缩实验,分析不同应变速率下模型冰宏观破坏特征以及应变速率对模型冰破坏模式的影响;基于 DIC 技术,揭示模型冰全场应变和裂纹的发展过程;对比分析相同应变速率下三种模型冰压缩强度和弹性模量的差异。本研究明确三种主流模型冰的力学行为、力学性能与海冰的差异,为极地工程模型实验提供了精准的选型标准与缩尺修正依据,进一步完善了海冰模型实验技术体系。

1 模型冰制备及实验方法

本文在低温实验室进行模型冰制备,分别冻制了盐水冰、尿素冰和 EG/AD/S 冰。模型冰生长方式为柱状,内部由掺加剂溶液和气泡组成,存在细小裂纹或缺陷。

1.1 模型冰掺加剂含量选择

模型冰掺加剂含量的选择需在强度相似与力学行为相似之间寻求最优平衡。过高浓度虽能提升模型冰强度缩尺的匹配度,但会导致冰体韧性增强、脆性断裂特征弱化,偏离海冰的实际破坏机理。本研究选取了两组掺加剂含量,制备两组模型冰,具体含量如表 1 所示。

表 1 两组模型冰掺加剂含量
Tab.1 The contents of the admixtures in two groups of model ice

模型冰类型	盐水冰	尿素冰	EG/AD/S冰
掺加剂物质	氯化钠 (NaCl)	尿素 (CO (NH ₂) ₂)	乙二醇 (EG)、脂肪族清洁剂 (AD)、蔗糖 (S)
第一组掺加剂含量	2.6%	5%	1.83%/0.128%/0.195%
第二组掺加剂含量	3.55%	10%	3.65%/0.255%/0.39%

1.2 模型冰制备方法

模型冰在尺寸为 570 mm×390 mm×190 mm 的模具中制备,较大的制备模型能够保障模型冰性质的一致性。首先按照预设比例将掺加剂加入对应模具中,注水至 70 mm 处并充分搅拌以保证掺加剂与水完全融合,随后在-18 ℃~-20 ℃ 环境温度下对溶液进行预冷,期间持续搅拌直至溶液温度比冰点高 0.1 ℃ 时停止搅拌并清理表面已形成的冰皮,在此温度下持续冰生长 27 小时使盒中冰层厚度达到 70 mm,接着将室内温度调至-1.5 ℃~-0.5 ℃ 让冰在此温度下回温,最后将制备好的模型冰切割为 70 mm×70 mm×175 mm 的标准试件。

1.3 实验方法

单轴压缩试验在低温试验箱内开展,实验环境温度设置为-10 ℃,温度控制精度为±0.1 ℃。压缩试验机选择 WDW-50E 型万能试验机。试验应变速率分别为 10⁻² s⁻¹、10⁻³ s⁻¹、10⁻⁴ s⁻¹。

DIC 实验中,实验温度控制为-10 ℃,采用白色和黑色罐装喷式油漆对冰试件进行散斑绘制,图 1(a)为绘制散斑后的模型冰试件。散斑绘制时需保持冰试件表面处于低温状态,喷涂白色油漆 4 次,由于试件处于低温环境内,保证油漆干燥需每次间隔 30 min 以上;试样表面趋于光滑时,改为喷涂黑色油漆 1 次,出口距离试样表面 0.8 m 左右,以保证黑色油漆尽可能均匀地落在白色表面上;喷漆后静置 3 小时以上。

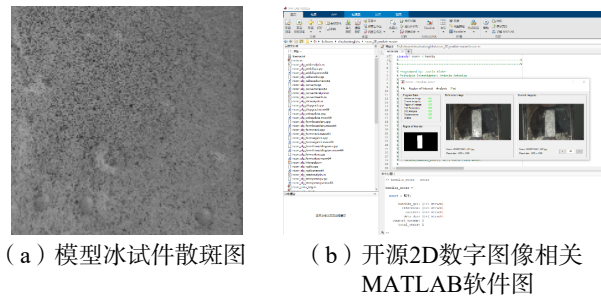


图 1 数字散斑图及 MATLAB 软件
Fig.1 Digital speckle pattern and MATLAB software

DIC 实验需要全程摄影,摄像机频率为 25 fps,分辨率为 1920 像素×1080 像素;利用开源 2D 数字图像相关 MATLAB 程序对实验图像进行处理,分析全场应变情况。图 1(b)为开源 2D 数字图像相关 MATLAB 程序图。

2 模型冰的宏观破坏行为研究

2.1 模型冰破坏特征分析

两组不同掺加剂含量的模型冰中,第二组模型冰由于掺加剂浓度过大,在高加载速率下,盐水冰由于内部晶体结构生长被海盐隔断,出现大量颗粒状碎块崩开的现象;尿素冰的破碎行为开始呈现一定的韧性,试验力达到最大值时开始出现缓慢的劈裂破坏;EG/AD/S冰的破碎行为呈现松软的雪状,受压的顶部出现小碎块破坏,进而导致失效。相比之下,第一组模型冰更符合海冰破坏机理,以下研究均围绕第一组模型冰展开。

从单轴压缩实验结果来看,盐水冰、尿素冰和EG/AD/S冰的宏观破坏行为基本一致,均存在韧性破坏、脆脆转变、脆性破坏三种模式。依据实时录像和试验过程记录,对盐水冰、尿素冰和EG/AD/S冰的破坏行为进行详细分析。

(1) 韧性破坏

应变速率为 10^{-4} s^{-1} 时,模型冰发生韧性破坏,表现为整体鼓胀,内部形成多个裂纹。图2为三种模型冰在 10^{-4} s^{-1} 应变速率下加载初始阶段、试验力峰值前和峰值时的破坏行为。加载过程中,盐水冰的细小裂纹发生扩展,逐步形成初始裂纹;随着压力的增加,初始裂纹继续扩展,出现多条裂纹,如图2(b)所示;当试验力达到峰值时,模型冰表面出现多条翼型裂纹,但冰试样整体并未出现大变形,如图2(c)所示。这一现象在尿素冰图像上也可明显观察到,图2(e)中可见多条裂纹,图2(f)呈明显塑性变形。EG/AD/S冰表面难以捕捉到裂纹的存在,但通过图2(g)、2(h)、2(i)的对比,仍可看出EG/AD/S冰存在明显的塑性变形。

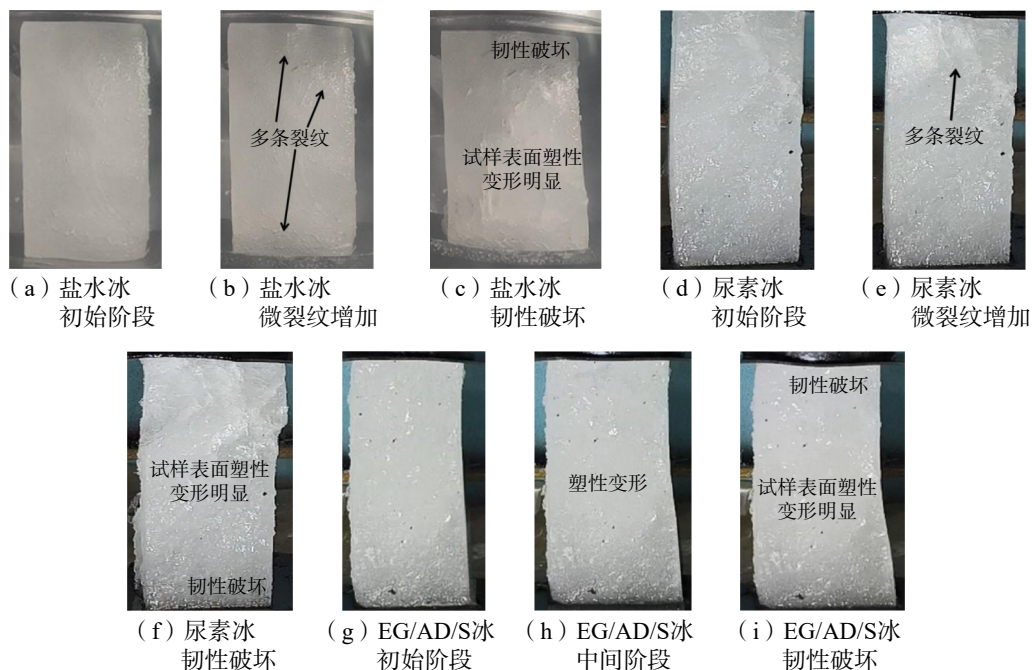


图2 应变速率为 10^{-4} s^{-1} 时鼓胀破坏

Fig.2 Bulging failure occurs at a strain rate of 10^{-4} s^{-1}

图3给出了应变速率为 10^{-4} s^{-1} 时三种模型冰的应力-应变曲线。为方便对比,图4给出了陈晓东^[6]所测海冰的应力-应变曲线。由图3与图4(a)海冰韧性破坏时的应力-应变曲线对比可知,盐水冰与尿素冰的曲线均存在波动,这是因为加载过程中冰体内气泡和微小缺陷引发局部应力集中,导致裂纹萌生与扩展,与图2(b)和2(e)中微裂纹增加的宏观特征对应,微裂纹扩展短暂阻断应力传递,导致应力小幅下降,而低应变速率下裂纹扩展缓慢,未形成贯穿主裂纹,冰体通过晶粒滑移、晶界调整继续承载,使应

力回升,形成波动。尿素冰应力峰值(约 0.4 MPa)低于盐水冰(约 1.0 MPa),源于尿素掺加剂在晶界形成弱化层,从而降低承载能力。EG/AD/S 冰曲线全程平滑无明显波动,达到峰值后应力缓慢下降,这是因为乙二醇、脂肪族清洁剂、糖均匀分散于冰晶间隙,乙二醇降低位错运动阻力,使变形以位错滑移为主,清洁剂抑制气泡团聚,减少缺陷源,从而减少裂纹萌生,体现出更强韧性,这与图 2(h)和 2(i)中无明显裂纹相对应。与海冰韧性阶段曲线波动特征相比,盐水冰、尿素冰更接近海冰,EG/AD/S 冰则表现出比真实海冰更强的韧性。

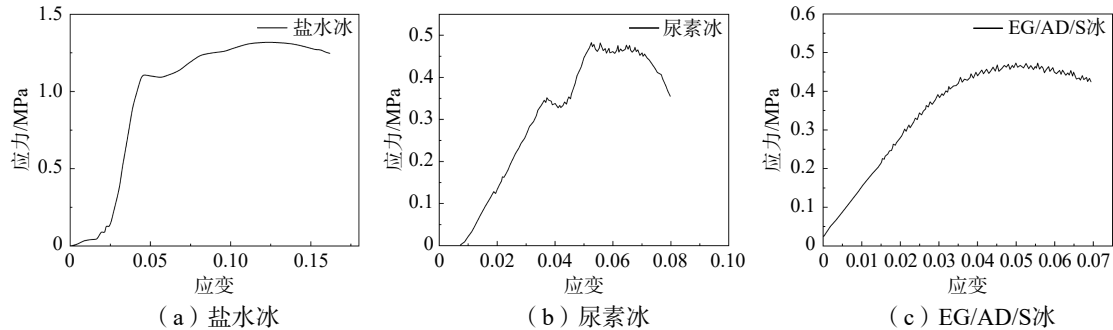


图3 应变速率为 10^{-4} s^{-1} 时模型冰应力-应变曲线

Fig.3 Stress-strain curves of model ice at a strain rate of 10^{-4} s^{-1}

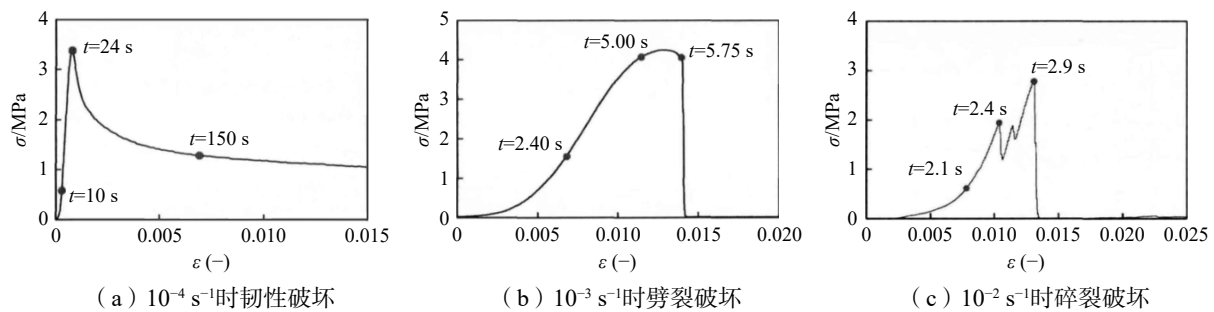


图4 海冰应力-应变曲线^[6]

Fig.4 Stress-strain curves of sea ice

(2) 韧脆转变破坏

应变速率为 10^{-3} s^{-1} 时,模型冰发生劈裂破坏,出现贯穿冰体上下的裂纹。图 5 为三种模型冰在 10^{-3} s^{-1} 应变速率下加载初始阶段、试验力峰值前和峰值时模型冰的破坏行为。随着试验力的加载,盐水冰上下两端出现如图 5(b)所示的明显塑性变形,裂纹尖端的应力积累到某一数值时,瞬间出现贯穿的主裂纹,最终发生劈裂破坏,如图 5(c)所示,并且主裂纹与加载方向存在一定的夹角。尿素冰在中间阶段同样出现明显塑性变形,与盐水冰不同的是,图 5(f)中尿素冰最终破坏时,除主裂纹外,左右两侧存在大量裂纹扩展。EG/AD/S 冰在加载中间阶段,呈现比盐水冰、尿素冰更轻微的塑性变形,在某一时刻瞬间发生劈裂破坏,如图 5(h)和 5(i)所示。可见,模型冰仍存在韧脆转变,韧脆转变区间仍在 10^{-3} s^{-1} 附近。

图 6 是三种模型冰应力-应变曲线,可以与图 4(b)海冰在韧脆转变阶段的应力-应变曲线对比。图 6(a)和 6(b)中,盐水冰和尿素冰在劈裂破坏的瞬间,其应力出现快速下降,但这种现象在 EG/AD/S 冰的应力-应变曲线上并没有体现,EG/AD/S 冰相较盐水冰和尿素冰呈现出更大的韧性。盐水冰和尿素冰表现出韧脆转变的典型响应,加载初期冰体表现韧性使应力线性上升,峰值时累积弹性应变能量超过裂纹扩展阈值,主裂纹瞬间贯穿,对应图 5(c)和 5(f)劈裂破坏的宏观特征,承载能力骤失;盐水冰骤降幅度更大,因盐晶颗粒冻结形成的晶间空隙使裂纹扩展能量释放更剧烈,脆性特征更显著。EG/AD/S 冰曲线呈“宽峰-缓慢下降”趋势,其峰值(约 0.5 MPa)与尿素冰接近,但峰值平台持续约 0.02 的应变区

间。这是由于乙二醇与糖分子形成的晶界黏结层阻碍裂纹沿晶扩展,清洁剂分散应力集中区域,避免能量瞬间释放,使 EG/AD/S 冰在该应变速率下未完全进入脆性阶段,保留一定韧性,体现出韧脆转变区间的滞后性,与图 9 中 10^{-3} s^{-1} 时 EG/AD/S 冰仍有韧性破坏占比的结果相呼应。与海冰韧脆转变阶段的破坏特征相比,盐水冰和尿素冰更接近天然海冰,EG/AD/S 冰表现出强韧性,与海冰存在差异。

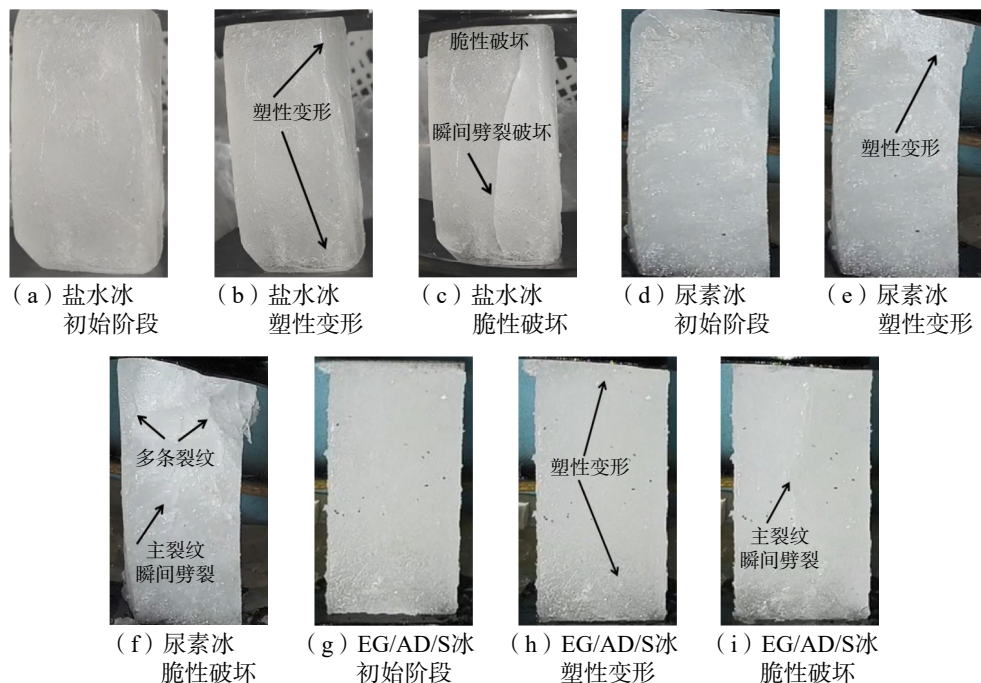


图 5 应变速率为 10^{-3} s^{-1} 时劈裂破坏

Fig.5 Splitting failure at a strain rate of 10^{-3} s^{-1}

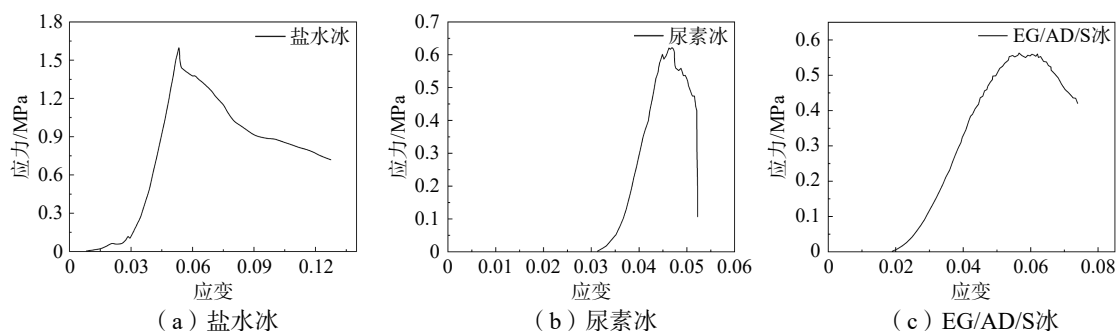


图 6 应变速率为 10^{-3} s^{-1} 时模型冰应力-应变曲线

Fig.6 Stress-strain curves of model ice at a strain rate of 10^{-3} s^{-1}

(3) 脆性破坏

应变速率增大到 10^{-2} s^{-1} 时,碎裂破坏更易发生,模型冰的破碎数量增加,碎块尺寸也逐渐变小,裂纹具有不规则性。图 7 为三种模型冰在 10^{-2} s^{-1} 应变速率下加载初始阶段、试验力峰值前和峰值时模型冰的破坏行为。随着加载的进行,盐水冰的第一条斜裂纹扩展断裂,如图 7(b)所示;第二条斜裂纹也迅速扩展断裂,且右侧面出现一条沿着加载方向的裂纹贯穿盐水冰,最终发生碎裂破坏,如图 7(c)所示。尿素冰在图 7(e)中出现小裂纹扩展并脱落;随着加载的进行,出现一条贯穿上半冰体的斜向裂纹,如图 7(f)所示,同时观察到其破碎的碎块呈现分层现象,这一发现与 Timco^[16]的结论一致。EG/AD/S 冰在整个加载过程中,也出现了明显的一次破坏和二次破坏现象,如图 7(h)和 7(i)所示。

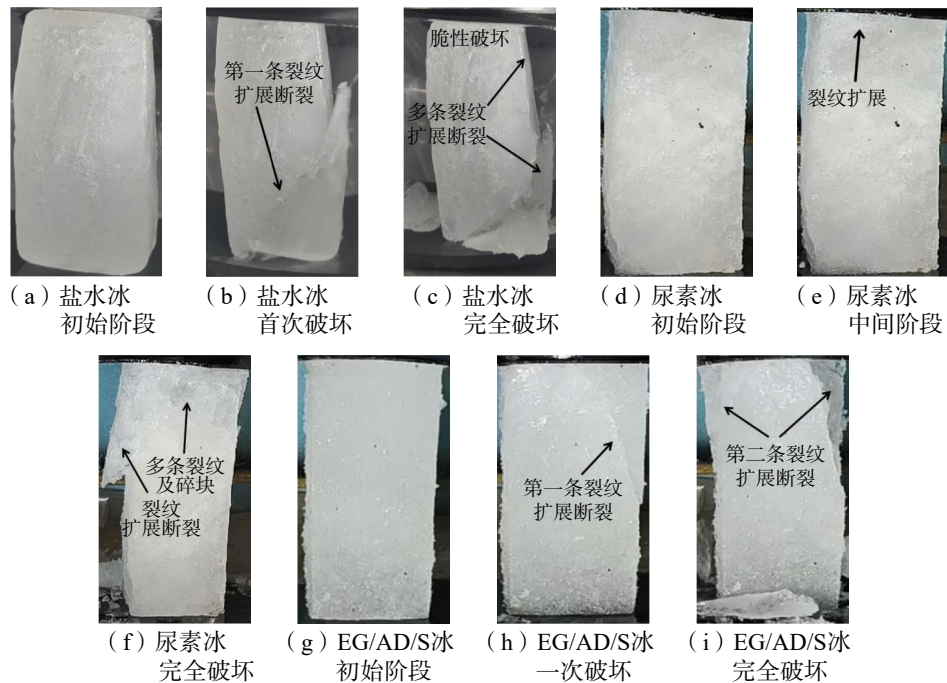
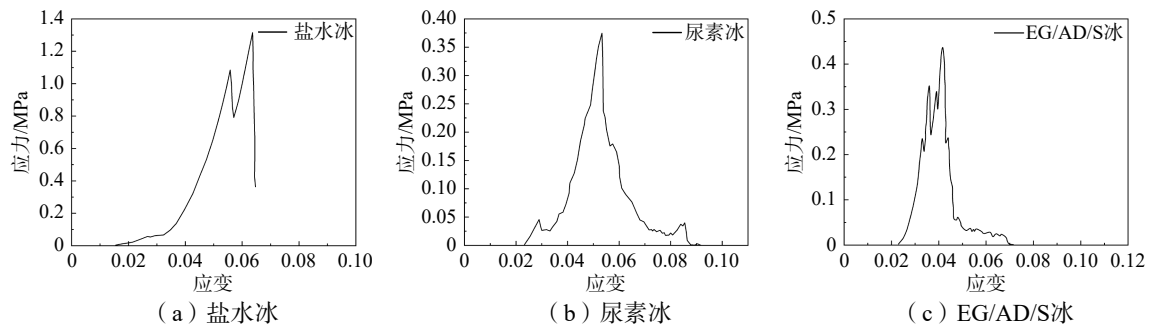
图7 应变速率为 10^{-2} s^{-1} 时碎裂破坏Fig.7 Fragmentation failure at a strain rate of 10^{-2} s^{-1}

图8给出了盐水冰、尿素冰和EG/AD/S冰的应力-应变曲线,可与图4(c)海冰在碎裂破坏下的应力-应变曲线进行对比。三种冰曲线均呈现高应变速率下脆性破坏的典型表现,加载速度快使应力瞬间累积,冰体碎裂。盐水冰首个峰值对应图7(b)中第一条斜裂纹的扩展断裂,第二个峰值对应图7(c)中第二条斜裂纹与贯穿裂纹的形成。尿素冰应力-应变曲线仅一个明显峰值(约0.35 MPa),这与图7(f)中的分层式脆性破坏相对应,即前期小裂纹仅在单层内扩展脱落,峰值仅对应贯穿上半冰体的斜向主裂纹;EG/AD/S冰曲线在最高峰值前有比盐水冰更多的明显小峰值,这是由于掺加剂使内部缺陷细小密集,高应变速率下多批次微裂纹扩展释放能量形成小峰值,图8(c)中的次峰对应图7(h)中的第一条明显裂纹,最高峰值则对应图7(i)中的第二条裂纹。与海冰脆性阶段多峰曲线的特征相比,盐水冰和EG/AD/S冰更接近天然海冰,尿素冰因“分层式脆性破坏”现象,其破坏行为与海冰存在差异。

图8 应变速率为 10^{-2} s^{-1} 时模型冰应力-应变曲线Fig.8 Stress-strain curves of model ice at a strain rate of 10^{-2} s^{-1}

2.2 应变速率对模型冰破坏模式的影响

为了明确不同模型冰韧脆转变区的范围,本节进一步讨论模型冰在不同应变速率下的破坏模式占比。图9分别为盐水冰、尿素冰和EG/AD/S冰在不同应变速率下破坏模式的转变情况。

从图9中可以看出,三种模型冰破坏模式的差异主要发生在应变速率为 10^{-3} s^{-1} 时。三种模型冰在 10^{-3} s^{-1} 应变速率下均以劈裂破坏为主,但盐水冰同时有部分碎裂破坏,更符合海冰破坏特征,尿素冰和EG/AD/S冰伴有韧性破坏,特别是EG/AD/S冰鼓胀破坏占比达到一半,韧性特征非常明显,这也与2.1节中EG/AD/S冰的韧性特征相对应。

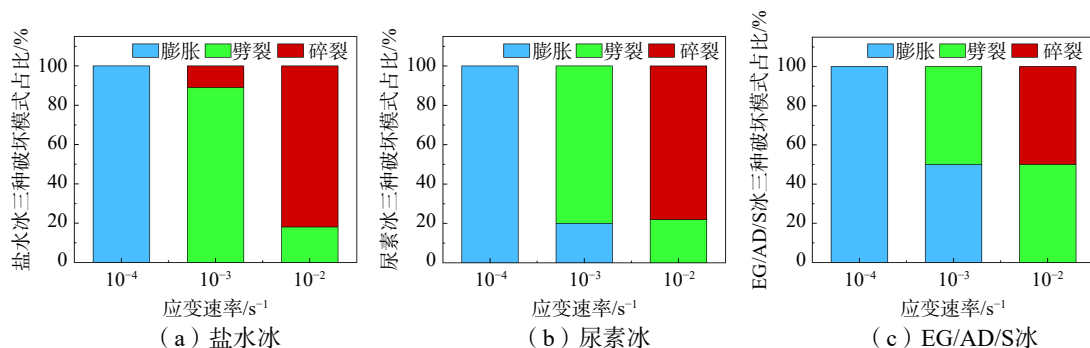


图9 模型冰在不同应变速率下的破坏模式

Fig.9 Failure modes of model ice under different strain rates

应变速率为 10^{-2} s^{-1} 时,盐水冰和尿素冰主要发生碎裂,对应脆性破坏阶段;EG/AD/S冰碎裂和劈裂的占比各为一半,发生脆性破坏的同时,韧脆转变特征也非常明显。

应变速率为 10^{-4} s^{-1} 时,三种模型冰均以鼓胀破坏为主,发生韧性破坏。

可以发现,EG/AD/S冰的韧脆转变区间对应的应变速率范围最宽, 10^{-2} s^{-1} 时韧脆转变特征也非常明显;盐水冰的破坏模式与天然海冰最相符;尿素冰的破坏模式与海冰相近,但相比盐水冰,韧性特征更强。

3 基于 DIC 技术的模型冰破坏行为研究

通过比较初始态和变形态试样表面的数字图像,DIC技术能够准确获取模型冰的全场位移和应变。本文旨在利用DIC技术,进一步明确模型冰的动态破坏过程。

3.1 DIC 技术可靠性验证

本次实验可靠性验证分为两个部分:评估散斑图质量和全场应变测量的精度。数字散斑相关方法要求物体表面的散斑图强度分布明显。这就对冰试件表面的散斑图质量提出了要求。散斑图的强度分布特征越明显,DIC测量的结果越精确。Pan等^[17]提出采用平均强度梯度 δ_f 评估数字散斑图质量, δ_f 数值越大,DIC技术测量精度也越高。平均强度梯度 δ_f 计算公式为

$$\delta_f = \sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^H |\nabla f(x_{ij})| / (W \times H) \quad (1)$$

其中, W 和 H 是图像的宽度和高度(以像素为单位); $|\nabla f(x_{ij})| = \sqrt{f_x(x_{ij})^2 + f_y(x_{ij})^2}$ 是局部强度梯度矢量的模量; $f_x(x_{ij})$ 和 $f_y(x_{ij})$ 为 x_{ij} 处相对于 x 方向和 y 方向的强度导数。

结合 Sodhi 等^[18]的研究,当散斑图的平均强度梯度大于 200 时,即可判定散斑图质量为良好,能够满足 DIC 全场应变测量的精度要求。本实验中试件初始图像的平均强度梯度在 243.42 ~ 289.95 之间,远高于该阈值。

提取部分万能试验机测得的峰值时刻应变数据,与 DIC 软件处理得到的峰值时刻的应变进行对比,以评估 DIC 方法的精度。表 2 给出了试验机加载应变与软件处理得到的应变对比结果,其误差范围均在 3% 以内。结果表明,DIC 方法可用于模型冰应变的测量。

表 2 试验测量应变与 DIC 测量应变对比

Tab.2 Comparison between the strain measured in the experiment and the strain measured by DIC								
试验测量应变	0.004 43	0.022 44	0.038 92	0.064 47	0.080 95	0.089 95	0.107 95	0.124 95
DIC测量应变	0.004 33	0.022 42	0.038 92	0.064 38	0.0809	0.089 81	0.107 89	0.123 83
误差	2.26%	0.09%	0	0.14%	0.06%	0.16%	0.06%	0.90%

3.2 模型冰破坏行为的细观分析

通过 2.1 节和 2.2 节的分析发现, 三种模型冰破坏特征的主要差异发生在应变速率为 10^{-3} s^{-1} 。因此, 本次试验的应变速率取为 10^{-3} s^{-1} 。为观察模型冰在破坏前、第一次破坏和二次破坏时的特征, 选取整个加载过程中出现首次破坏前、首次破坏和二次破坏三个时刻的破坏情况开展分析。图 10(a)、(b)、(c)分别为盐水冰、尿素冰和 EG/AD/S 冰应力-应变曲线上三个时间点(①、②、③)的位置。其中, ③点为最明显破坏发生时刻, 前两个点对应的模型冰处于屈服阶段或发生轻微破坏, 但均出现不同的应变分布情况, 能够反映③点局部断裂扩展的形成过程。图 11~13 依次为盐水冰、尿素冰、EG/AD/S 冰在上述三个特征时刻的全场应变分布云图, 分别对应模型冰在首次破坏前、首次破坏、二次破坏三个阶段的细观变形特征与应变演化规律。

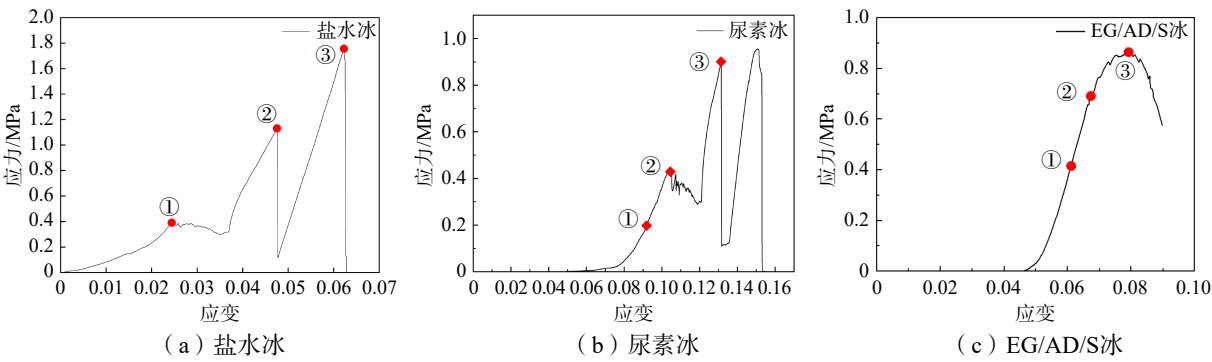


图 10 模型冰在应力-应变图中的时间点位置

Fig.10 The position of the time points of the model ice in the stress-strain diagram

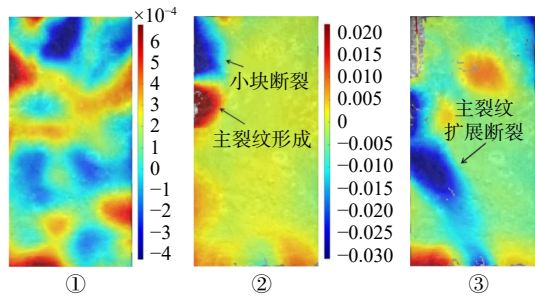


图 11 盐水冰 DIC 方法图像处理结果

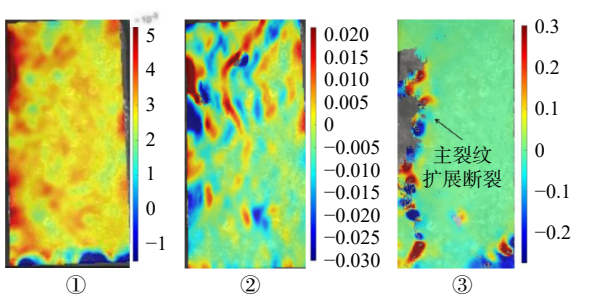


图 12 尿素冰 DIC 方法图像处理结果

Fig.11 The results of image processing using the DIC method for saline ice Fig.12 The results of image processing using the DIC method for urea ice

盐水冰发生碎裂破坏, 在图 11①点时可以看出, 在试样发生第一次破坏之前, 试样表面存在多条 45° 斜向应变带, 冰试样底部颜色较深, 出现大变形; 在②点时, 盐水冰左上方发生破坏, 对应图 10(a)②时刻峰值, 侧面应变最大, 这也是主裂纹萌发区域; 在③点时, 冰样左上角发生明显破碎, 由②时刻高压区发生裂纹扩展, 冰样左下侧出现一条 45° 高压带, 冰样发生局部断裂破坏, 呈现 45° 翼型裂纹。

尿素冰发生碎裂破坏, 在图 12 中①时刻, 表面应变明显比盐水冰更分散; ②时刻表面上半区域的应变呈现明显的 45° 角翼型形状, 侧面颜色更深, 左上方出现小型破坏, 对应图 10(b)中②时刻峰值, 由

其高应变区分布方向推断左侧必然出现裂纹扩展;③时刻,裂纹进一步扩展,高应变区形成一条线,冰样左侧发生断裂破坏。通过 DIC 技术发现,相较于另外两种模型冰,尿素冰表面仅上半区呈现大量变形,但下半区域变形较少,这一现象也对应尿素冰在宏观状态下出现的分层破坏现象。

EG/AD/S 冰发生劈裂破坏,处于韧脆转变阶段。EG/AD/S 冰在①时刻,表面与其余两种模型冰有较大差别,冰呈现整体变形,底部出现大变形;②时刻变形继续增大,裂纹增多,仍为整体变形,底部出现明显高压区;③时刻时,由②时刻底部高压区发生裂纹扩展断裂,主裂纹贯穿冰体,底部区域应变最大。

对比三种模型冰的差异可知,在相同应变速率下,盐水冰和尿素冰呈脆性破坏,EG/AD/S 冰发生韧脆转变,与 2.2 节结论相对应,且其应力-应变曲线更平滑(类似 2.1 节),韧性更强。微观上,盐水冰晶界结合力强,裂纹穿晶形成 45°翼型裂纹;尿素冰晶界偏析弱化,沿晶断裂呈竖向裂纹,高孔隙率与晶界弱化耦合导致中期变形复杂;EG/AD/S 冰成分均匀,加载初期位错滑移主导韧性变形,处于韧脆转变阶段。

4 模型冰力学性能对比分析

4.1 模型冰压缩强度对比分析

图 14 给出了-10℃,不同应变速率下,盐水冰、尿素冰和 EG/AD/S 冰的压缩强度变化情况。从图中可以看出,随着应变速率的增加,三种模型冰压缩强度均为先增大后减小。无论是盐水冰、尿素冰还是 EG/AD/S 冰,在应变速率为 10^{-3} s^{-1} 时,抗压强度最大。盐水冰压缩强度为 0.9~1.3 MPa;尿素冰为 0.08~0.2 MPa;EG/AD/S 冰压缩强度最小,最高只有 0.07~0.12 MPa。

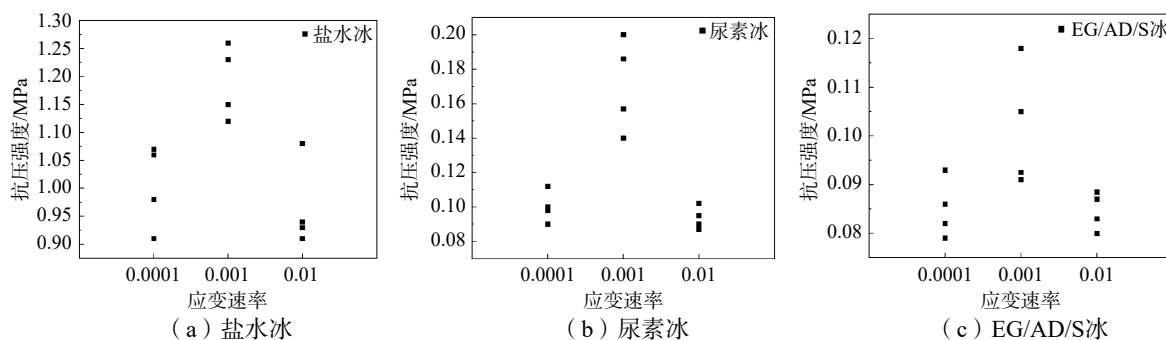


图 14 应变速率对模型冰压缩强度的影响

Fig.14 Influence of strain rate on the compressive strength of model ice

本实验得到的数据中,模型冰在同一应变速率下强度存在差异,如盐水冰在 10^{-4} s^{-1} 应变速率下压缩强度介于 0.9~1.1 MPa,这是由于冰本身力学性质受多因素影响,具有一定的随机性。参考李伟^[19]的研究, 10^{-4} s^{-1} 应变速率下单层冰压缩强度介于 0.7~1.1 MPa, 10^{-3} s^{-1} 应变速率下由于冰破坏模式的不同,强度差异更大,达到 1.5~2.5 MPa。因此本实验所得数据差异属于正常现象。

极地柱状海冰单轴压缩强度为 0.7~2.2 MPa^[16],在模型冰与海冰破坏行为相似的前提下,盐水冰压缩强度在海冰压缩强度范围内,尿素冰、EG/AD/S 冰与海冰的强度比值约为 0.16 : 1。

不同模型冰力学性能差异源于掺加剂的不同:盐水冰类似海冰,晶界与盐晶调控裂纹(穿晶+沿晶

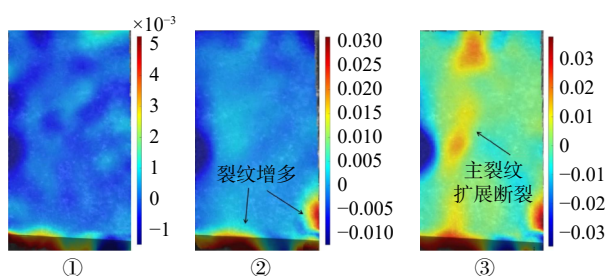


图 13 EG/AD/S 冰 DIC 方法图像处理结果

Fig.13 The results of image processing using the DIC method for EG/AD/S ice

断裂), 强度与海冰重叠度高, 相似性最优; 尿素冰晶界弱化, 以沿晶断裂为主, 耗能低, 强度偏低; EG/AD/S 冰掺加剂阻裂增韧, 韧脆转变区延长, 高应变速率下仍有韧性变形, 几乎无穿晶断裂, 强度最低。

4.2 模型冰弹性模量对比分析

图 15 给出了不同应变速率下模型冰弹性模量的变化情况。实验结果表明, 冰随着应变速率的升高, 盐水冰、尿素冰和 EG/AD/S 的弹性模量均呈现上升趋势。三种模型冰的弹性模量依次降低, 盐水冰的弹性模量在 35~120 MPa 之间; 尿素冰的弹性模量在 10~90 MPa 之间; EG/AD/S 冰最小, 弹性模量在 10~60 MPa 之间。冰的力学性质受多因素影响, 极地海冰弹性模量介于 0.4~2.3 GPa^[20], 与之相比, 本实验数据中同一应变速率下弹性模量的差异属于正常现象。

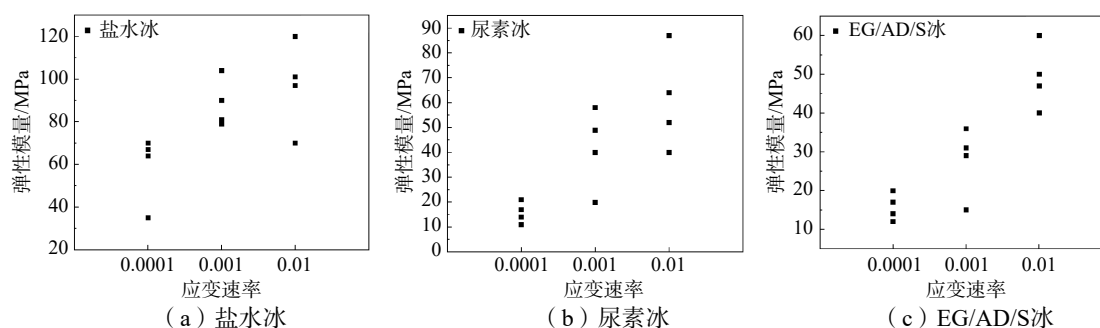


图 15 应变速率对模型冰弹性模量的影响

Fig.15 Influence of strain rate on the elastic modulus of model ice

在满足破坏行为相似的前提下, 三种模型冰弹性模量与海冰各不相同。盐水冰与海冰弹性模量之比为 0.08:1, 尿素冰、EG/AD/S 冰与海冰的弹性模量之比约为 0.025:1。

模型冰弹性模量差异与成分密切相关: 盐水冰盐晶均匀分散、晶界无弱化、结构致密, 模量居中 (35~120 MPa); 尿素偏析形成晶界弱化层, 分解产生的气泡破坏结构, 晶界易滑移, 模量较低 (10~90 MPa); EG/AD/S 冰掺加剂导致晶界结合力弱, 致密性和刚度最低, 模量最低 (10~60 MPa)。

5 结 论

本文通过单轴压缩试验、DIC 技术, 针对模型实验中三种主流模型冰的破坏行为及力学性能差异开展研究, 得出以下结论:

(1) 通过开展单轴压缩试验发现, 三种模型冰的破坏模式与海冰基本相同。盐水冰在 10^{-3} s^{-1} 应变速率下脆性破坏占比少, 更符合海冰破坏特征; 尿素冰在 10^{-2} s^{-1} 下脆性破坏时伴有分层破碎现象; EG/AD/S 冰在 10^{-4} s^{-1} 、 10^{-3} s^{-1} 下挤压破坏时韧性特征非常明显, 在 10^{-2} s^{-1} 下仍有半数发生劈裂破坏, 与海冰存在较大差异, EG/AD/S 冰韧脆转变区间对应的应变速率最高。

(2) 基于 DIC 技术, 设定应变速率为 10^{-3} s^{-1} , 发现盐水冰处于脆性阶段, 加载过程中表面变形呈 45° , 最终破坏为 45° 翼型裂纹; 尿素冰也处于脆性阶段, 加载过程中表面变形最多, 最终破坏为竖向裂纹; EG/AD/S 冰处于韧脆转变阶段, 韧性特征明显, 加载过程中表面呈整体变形, 最终发生劈裂破坏。

(3) 关于应变速率对模型冰压缩强度的影响, 模型冰压缩强度均随应变速率的升高先增大后降低。在模型冰与海冰破坏行为相似的前提下, 盐水冰与海冰强度比约为 1:1, 尿素冰、EG/AD/S 冰与海冰强度比约为 0.16:1; 分析应变速率对模型冰弹性模量的影响, 随着应变速率的升高, 盐水冰、尿素冰、EG/AD/S 冰的弹性模量均呈现上升趋势, 在模型冰与海冰破坏行为相似的前提下, 盐水冰与海冰的弹性模量比约为 0.08:1, 尿素冰、EG/AD/S 冰与海冰的弹性模量比约为 0.025:1。

综上, 若实验核心是模拟海冰与结构的相互作用, 如韧脆转变区间的冰荷载计算、结构抗冰设计验

证,则优先选用盐水冰,其弹性模量、强度的速率依赖性及破坏模式与海冰最契合,能最大程度降低相似性偏差;若仅需开展低成本批量筛查试验,如不同结构方案的冰强度初步对比,可选用尿素冰,虽弹性模量偏低,但制备工艺简单、成本低廉且破坏模式稳定,适合快速获取趋势性数据;若需模拟低应变速率下高韧性冰体与结构相互作用的场景,如浮式平台低速碰撞冰面,则选用 EG/AD/S 冰,其低弹性模量带来的强韧性变形特征,可精准复现“冰体塑性鼓胀-结构低应力响应”的实际工况。

参 考 文 献:

- [1] 王 川,叶柔柔,刘志慧. 碎冰与圆柱结构相互作用实验技术研究[J]. 科技创新与应用, 2024, 14(12): 63–66.
Wang C, Ye R R, Liu Z H. Experimental study on the interaction technology between broken ice and cylindrical structures[J]. Technology Innovation and Application, 2024, 14(12): 63–66. (in Chinese)
- [2] 付殿福,李 伟,张 晖,等. 考虑多桩掩蔽的导管架平台井口区冰载荷模型试验研究[J]. 中国海上油气, 2025, 37(4): 183–192.
Fu D F, Li W, Zhang H, et al. Experimental study on ice load model tests of the wellhead area of jacket platforms considering multi-pile shielding[J]. China Offshore Oil and Gas, 2025, 37(4): 183–192. (in Chinese)
- [3] Palmer A, Johnston I. Ice velocity effects and ice force scaling: IUTAM Symposium on Scaling Laws in Ice Mechanics and Ice Dynamics[C]//The IUTAM Symposium, Fairbanks, Alaska, USA. 2001: 115–126.
- [4] 黄 焱,史庆增,宋 安. 冰力模型实验中的模型律[J]. 冰川冻土, 2003(S2): 352–355.
Huang Y, Shi Q Z, Song A. Similarity laws in ice force model experiments[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003(S2): 352–355. (in Chinese)
- [5] 田于逵,岳前进,孔 帅,等. 冰水池中海冰模拟技术现状与关键问题[J]. 船舶力学, 2023, 27(1): 153–162.
Tian Y K, Yue Q J, Kong S, et al. Current status and key issues of sea ice simulation technology in ice tanks[J]. Journal of Ship Mechanics, 2023, 27(1): 153–162. (in Chinese)
- [6] 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 the thermodynamic interaction process between sea ice and seawater and the uniaxial compressive strength characteristics of sea ice[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [7] 刘禹博,王庆凯,卢 鹏,等. 粒状海冰单轴压缩强度的试验研究[J]. 船舶力学, 2025, 29(7): 1100–1112.
Liu Y B, Wang Q K, Lu P, et al. Experimental study on the uniaxial compressive strength of granular sea ice[J]. Journal of Ship Mechanics, 2025, 29(7): 1100–1112. (in Chinese)
- [8] Zhang A, Yang B, Zhang G, et al. Mechanical properties and damage evolution of three-dimensional random porous sea ice based on meso-scale analysis[J]. Cold Regions Science and Technology, 2025, 240: 104640.
- [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. Analysis of the uniaxial compressive strength of columnar brine model ice in the small ice basin of China Ship Scientific Research Center[J]. Journal of Ship Mechanics, 2020, 24(12): 1647–1656. (in Chinese)
- [10] 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 the characteristics of uniaxial compressive strength of conventional model ice in the basin[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2025, 20(2): 266–282. (in Chinese)
- [11] Kim J H, Choi K S, Jeong S Y, et al. An experimental study for the mechanical properties of model ice grown in a cold room[J]. Journal of Ocean Engineering and Technology, 2008, 22(3): 64–70.
- [12] Huang Y, Han J, Sun J. An improvement on the model test scaling method used for predicting ice load on vertical pile[J]. Ocean Engineering, 2025, 324: 120714.
- [13] Pan B, Qian K, Xie H, et al. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: A review[J]. Measurement Science & Technology, 2009, 20(6): 1–17.
- [14] Lian J J, Ouyang Q N, Zhao X, et al. Uniaxial compressive strength and fracture mode of lake ice at moderate strain rates based on a digital speckle correlation method for deformation measurement[J]. Applied Sciences, 2017, 7(5): 495–523.

- [15] Wang A L, Wei Z J, Chen X D, et al. Brief communication: Full-field deformation measurement for uniaxial compression of sea ice using the digital image correlation method[J]. *The Cryosphere*, 2019, 13(5): 1487–1494.
- [16] Timco G W. EG/AD/S: A new type of model ice for refrigerated towing tanks[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 1986, 12: 175–195.
- [17] Pan B, Lu Z X, Xie H M. Mean intensity gradient: an effective global parameter for quality assessment of the speckle patterns used in digital image correlation[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(4): 469–477.
- [18] Sodhi D S. Crushing failure during ice–structure interaction[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2001, 68(17-18): 1889–1921.
- [19] 李 伟, 徐 滢, 申 辰, 等. 重叠冰单轴压缩强度特性的试验研究[J]. *海洋环境科学*, 2025, 44(4): 524–533.
Li W, Xu Y, Shen C, et al. Experimental study on the uniaxial compressive strength characteristics of overlapping ice[J]. *Marine Environmental Science*, 2025, 44(4): 524–533. (in Chinese)
- [20] 王庆凯, 李志军, 王 颖, 等. 湖冰作为极地海冰技术中试基地的探讨[J]. *船舶工程*, 2024, 46(6): 26–36.
Wang Q K, Li Z J, Wang Y, et al. Discussion on lake ice as a pilot test base for polar sea ice technology[J]. *Ship Engineering*, 2024, 46(6): 26–36. (in Chinese)