



激光破冰前后单轴压缩破坏模式及强度特性对比

The comparative study on failure mode and strength characteristics under uniaxial compression before and after laser ice-breaking

期刊：	中国科学: 物理学 力学 天文学
稿件ID：	SSPMA-2026-0285.R2
稿件栏目：	论文
作者提交日期：	2026-05-27
参与作者列表：	薛彦卓, 张扬, 鲁阳, 倪宝玉
关键词：	激光破冰, 单轴压缩强度, 破坏模式, 韧-脆转化
英文关键词：	laser ice-breaking, uniaxial compression strength, failure mode, brittle-ductile transition
学科领域：	损伤力学
专题：	固体力学中材料变形和失效：新现象、新理论
注意：以下文件由作者提交以供同行评审, 但不能转换为PDF. 您必须在线查看这些文件.	
图1.rar	
图2.rar	



论文

激光破冰前后单轴压缩破坏模式及强度特性对比

薛彦卓¹, 张扬¹, 鲁阳^{1*}, 倪宝玉¹

1. 哈尔滨工程大学船舶工程学院, 哈尔滨 150001

* E-mail: luyang@hrbeu.edu.cn

收稿日期: 2016-01-01; 接受日期: 2016-01-01

国家自然科学基金 (Nos. 52521009, W2541018, 52192693, 52192690, 52371270, W2433140)项目资助

摘要 淡水冰的破坏模式在不同加载速率下呈现出韧-脆转化特征. 为研究激光初始缺陷对冰力学性能的劣化效应及韧-脆转化机理, 本文在-20 °C 受控低温环境下对完整淡水冰与激光预处理淡水冰进行了单轴压缩对比试验. 该试验采用的冰样为实验室人工制备的柱状淡水冰, 试验中利用光纤激光器对几何尺寸为 80 mm×80 mm×200 mm 的长方体试样进行定点穿透, 并施加垂直于生长方向的压缩载荷, 由此得到两类冰样在不同加载速率下的单轴压缩强度及力学响应. 在试验过程中所采用的应变率区间为 $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$. 由于在不同加载速率下应变率的不同, 两类冰样均呈现出韧性、韧-脆过渡和脆性 3 种不同的破坏阶段: 在加载速率较低、冰处于韧性破坏时, 完整冰样表现为微裂纹弥散与整体鼓胀, 而激光冰样则通过孔洞周边的局部蠕变变形吸收能量, 最终呈现为由宏观缺陷主导的局部失稳压溃; 当加载速率较高、冰处于脆性破坏时, 完整冰样因裂纹无序扩展构成随机碎裂破坏, 而激光孔洞展现出强烈的定向引裂能力, 使得裂纹沿孔壁稳定生长并交汇产生规则的贯穿主裂纹, 形成“十字形”劈裂. 以上试验结果还表明, 激光热冲击并未改变冰体发生韧-脆破坏转化的应变率区间, 但极大地削弱了冰体的极限承载效能, 在全应变率区间内, 激光预处理冰样的最大静态抗压强度和等效弹性模量较完整冰样大幅下降了 65.8%–71.9% 和 66.4%–68.0%, 且破坏强度的离散性显著降低.

关键词 激光破冰, 单轴压缩强度, 破坏模式, 韧-脆转化

1 引言

极地区域蕴含丰富的战略资源与极具经济价值的极地航道, 近年来已成为全球海洋探测与资源开发的战略前沿. 然而, 极区水域常年覆盖的厚重坚冰对船舶的冬季通航与海洋工程结构物的安全服役构成了严峻挑战^[1,2]. 传统的依靠破冰船自重冲撞的纯机械破冰模式, 不仅面临推进阻力大、能耗极高的工程

瓶颈, 且极易对船体结构造成不可逆的损伤. 为突破这一局限, 水射流破冰、气泡破冰等新型辅助破冰技术应运而生^[3,4]. 在此背景下, 通过激光破冰以实现主动降载的技术路径受到了广泛关注, 作为一种典型的高能束流辅助手段, 激光与冰体的相互作用会引发复杂的损伤演化, 探明其对冰体力学性质的影响及失效机理的转换, 已成为当前极地工程领域的研究热点. 作为极区破冰工程的直接作用对象, 天然海冰与

引用格式: 薛彦卓, 张扬, 鲁阳, 等. 激光破冰下淡水冰压缩强度与破坏模式对比. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2026
Xue Y Z, Zhang Y, Lu Y, et al. The comparative study on failure mode and strength characteristics under uniaxial compression before and after laser ice-breaking (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2026,

淡水冰在受载条件下的力学响应, 直接决定了各类破冰手段的最终效能。在跨越临界应变率阈值后, 冰体在脆性阶段的强度演化规律在学界仍存争议。这种争议本质上源于冰体在不同应变率量级下主导失效机制的根本性转变。例如 Böhm 等人^[5]的研究表明, 当应变率高于 $4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 时, 裂纹的失稳扩展在损伤中占据绝对主导, 宏观抗压强度开始出现显著下降。然而, Shazly 等人^[6]利用分离式霍普金森压杆 (SHPB) 在 $60 \sim 1400 \text{ s}^{-1}$ 的高应变率下观察到了显著的正应变率敏感性。这种从负效应向正效应的逆转, 并非文献结论的矛盾, 而是不同应变率区间内力学机制竞争的结果, 在 Böhm 等人^[5]所述的中等应变率脆性阶段, 裂纹的快速成核与贯穿导致冰体在达到理论极限前即发生整体碎裂, 但在 Shazly 等人^[6]所述的极高应变率冲击下, 极短的加载时间极大限制了内部微裂纹的充分扩展与交汇, 加之高应变率下冰体碎块间强烈的惯性约束与动态摩擦做功, 使得宏观残余强度大幅提升。

从能量演化角度, Peng 等人^[7]建立了基于畸变能、内能与阻尼能守恒的应变率相关强度准则, 揭示了宏观强度的应变率效应受控于接触过程中的能量耗散机制。在基础损伤理论与宏观力学性能评价方面, Schulson^[8]系统阐述了多晶冰在压缩状态下由微裂纹成核、摩擦滑移及裂纹扩展主导的脆性失效物理模型, 深刻揭示了裂纹尖端蠕变松弛与裂纹失稳扩展相互竞争所驱动的韧-脆转化机制。此外, Timco 等人^[9]通过对大量测试数据的系统梳理, 全面总结了冰体单轴抗压强度随应变率、温度等物理参数的变化规律, 厘清了常规工程应变率区间内强度的非线性演化边界与包络特征。微观断裂力学方面, Schulson 与 Gratz^[10]明确了多晶冰在三轴加载下的库仑脆性破坏规律; Batto 与 Schulson^[11]则证实, 当应变率跨越阈值时, 裂纹尖端蠕变松弛率不足以抑制应力集中, 翼型裂纹的失稳扩展直接导致脆性破坏。对于远超临界阈值的冲击加载, Kim 与 Keune^[12]测定了 10^{-3} s^{-1} 量级下的动态承载特征, 发现冰体强度在该极高应变率区间内并未继续显著上升, 而是基本维持在一个恒定的水平。

在内部孔隙等物理缺陷的干预机制方面, Wang 等人^[13]对富气海冰的研究表明, 气体体积分数主要削弱抗弯强度, 而卤水体积则主导了应变模量的衰减。Li 等^[14]获取了渤海海冰在宽应变率下的单轴压缩特

性, 构建了压缩强度与孔隙率及应变率之间的曲面关系模型。Wang 等人^[15]针对夏季北极海冰的测试显示, 融化期海冰的压缩强度随孔隙率增加呈幂律衰减, 并表现出较弱的孔隙效应与更低的韧脆转化应变率阈值。Potter 等人^[16]结合 SHPB 技术对比了含孔隙冰与致密冰的动态响应, 结果证实高密度无缺陷冰的动态峰值强度显著更高, 且动态抗压强度与冰体密度呈线性正相关。Han 等人^[17]进一步明确了夏季北极海冰在脆-韧转变区间内的劣化规律, 证实单轴压缩强度随总孔隙率增加呈线性下降, 且峰值强度随温度降低呈现稳步上升的敏感性特征。

在破坏机制的精细化表征方面, Chen 等人^[18]深入揭示了冰体力学行为演化的内在机理: 在低应变率下, 冰体内部微裂纹尖端的应力集中主要通过晶间滑移与蠕变松弛得以有效释放, 宏观上表现为多裂纹缓慢发育的韧性破坏^[19,20]; 而当加载速率跨越转化阈值时, 微裂纹的扩展速度彻底超越蠕变松弛率, 导致裂纹迅速贯穿冰体, 最终演化为由劈裂或碎裂主导的脆性断裂^[21,22]。此外, Han 等人^[23]利用数字图像相关技术 (Digital Image Correlation, DIC) 对含纤维状孔隙冰体在受压条件下的变形特征进行了实时追踪, 直观量化了局部物理缺陷引发的应力集中对宏观刚度和极限应变的削弱效应。上述研究系统揭示了完整致密冰体及自然孔隙冰在常规荷载下的力学劣化规律, 为准确评估宏观冰载荷奠定了坚实的理论基础。

目前, 学界关于激光诱导热损伤后冰体力学性能演化及破坏机理的针对性探讨依然匮乏。现有文献多聚焦于激光参数对冰体融化与击穿效率的单纯热力学分析^[24,25], 或是探讨激光诱导热应力引发的裂纹扩展特征及其在表层除冰中的应用^[26,27]。尽管近期已有研究开始关注激光预处理结合冲击载荷下的水下破冰力学行为, 并初步验证了激光孔洞对冰体宏观抗冲击强度的削弱作用^[28], 但此类研究多局限于特定动态载荷下的破坏现象, 尤其是这种干预作用是否会改变冰体发生韧-脆转化的“应变率门槛”, 目前尚缺乏系统且深入的对比研究。

鉴于以上, 本文针对激光预处理对冰体力学性能的劣化效应及失效机理转换展开基础性研究, 全文的逻辑结构如下: 第 2 节介绍受控低温环境下完整淡水冰与冰样的制备过程及激光破冰和单轴压缩试验方案; 第 3 节将对比分析不同加载速率下两类冰样的破坏演化过程, 掌握激光孔洞及热损伤对冰体韧、脆性

失效路径的改变规律; 第 4 节将揭示单轴压缩下冰体力学响应的变化特征, 分析应力-应变演化过程及应变率对最大静态抗压强度与等效弹性模量的影响规律, 探明激光初始缺陷引发的定向引裂与宏观卸载机制。

2 冰样制备与试验方案

冰体力学响应与激光穿透效率对温度极度敏感。为消除热波动干扰, 本研究搭建了受控低温试验环境, 以保障试样制备、激光处理及压缩全周期的温度一致性。

2.1 淡水冰样的制备与物理特征

本试验采用的冰样均为实验室人工制备的淡水冰。为消除冰内气泡、孔隙等初始缺陷, 保证试样物理特征与光学特征的一致性, 制冰用水在冷冻前统一经过加热煮沸排气处理。当水体表面降温至过冷状态时, 采用喷雾引晶法在水面均匀喷洒细水雾, 促使表层快速激冷成核, 形成初始的均匀细晶层, 在引晶的作用下, 冰样内部晶体结构沿深度方向呈现规律性的演化特征。图 1 展示了不同深度处的冰晶形貌: 距上表面 0.5 cm 处的冰体 (图 1a) 主要由细小的粒状晶组成, 属于由于表面快速冷却形成的晶核层; 随着深度增加至 5 cm (图 1b), 晶体尺寸逐渐增大, 开始呈现过渡态; 当深度达到 8 cm 时 (图 1c), 冰体已形成晶轴沿冷冻方向择优生长的柱状晶体结构。Weewew

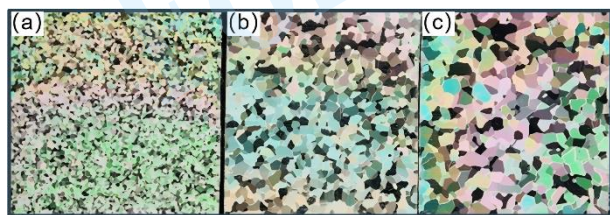


图 1 冰样晶体结构. (a) 距上表面 0.5 cm; (b) 距上表面 5 cm; (c) 距上表面 8 cm

Figure 1 Crystal structure of the ice sample. (a) 0.5 cm from the top surface; (b) 5 cm from the top surface; (c) 8 cm from the top surface.

冰样成型后, 利用专用切割机统一切割加工为标准长方体试样如图 2 所示, 试样截面尺寸为 80 mm × 80 mm, 高度为 200 mm, 满足单轴压缩力学测试推荐的尺寸高宽比为 2.5:1 的比例要求。为尽可能避免加工过程中的摩擦生热与机械振动在冰体内部诱发

微裂纹等二次损伤, 试样的所有切割与打磨工序均严格在 -20 °C 的受控冷库中进行, 且切割机与打磨用细砂纸等所有工装设备在操作前均已提前在冷库中静置 3~4 h 进行了充分的预冷处理。试样切割完成后, 采用细砂纸对其上下承压端面进行精细打磨, 严格控制两端面的平整度与平行度, 加工完成并经几何尺寸检查合格的试样均由薄膜密封包裹, 随后统一置于 -20 °C 恒温环境中静置 24 h 以上, 以消除机械加工产生的温度波动并防止冰样升华, 备后续激光穿透及单轴压缩测试使用。



图 2 冰样示意图

Figure 2 The sketch of the ice sample.

2.2 激光穿透处理及损伤特征

本试验搭建了如图 3 所示的激光破冰实验系统。核心设备包括波长为 1064 nm 的光纤激光器、聚焦透镜组、低温试验箱及多组可调升降台。本试验选用的光纤激光器运行参数设定为输出功率 1000 W、脉冲频率 5000 Hz, 光束的能量密度在空间上呈典型的高斯分布。在系统布置与对中调节时, 激光束经透镜组聚焦, 其焦点被精确定位于冰样内部的几何中心。在中心焦点位置处, 激光束的有效作用半径约为 2.5 mm; 结合设定的输出功率, 该焦点区域的平均激光功率密度约为 5102 W/cm²。鉴于激光破冰的主要机理依赖于高能光束产生局部的热作用穿透, 冰样的初始温度对其能量吸收效率及热传导过程影响极大, 因此试验全过程低温环境箱的内部工作温度被严格设定并恒定在 -20 °C, 以确保冰样状态稳定。在系统布置上, 光纤激光器、聚焦透镜以及环境箱内的冰样载物台均配备了独立的升降机构, 通过精准调节其高度, 使激光出射端、透镜光心与冰试样侧面的几何中心严格处于同一水平光轴上。

在实验过程中, 首先将预处理好的标准冰试样放

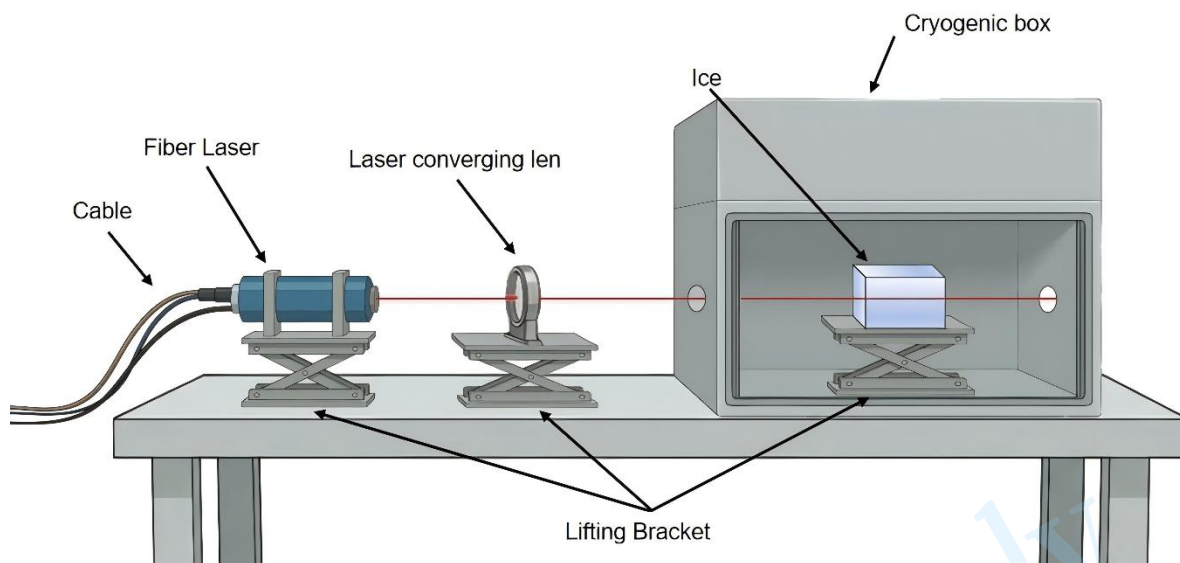


图 3 实验装置示意图

Figure 3 Schematic diagram of the experimental setup.

置于环境箱内的载物台上, 并启动激光器系统。高能激光束经透镜组聚焦后, 水平穿过环境箱侧壁的通光孔, 以定点热穿透的方式垂直照射在长方体冰试样的侧面中心位置, 引起冰体内部的局部熔蚀或汽化损伤。激光照射完成后, 为最大限度减少转移操作引起的冰样温度波动及新生成裂纹的演化, 全程需确保在低温操作条件下进行, 迅速将含热损伤的冰试样从环境箱移出, 并立即转移至配套的低温单轴加载设备中开展后续的力学测试。

2.3 单轴压缩试验与加载方案

为了准确重现破冰船在实际航行中与自然冰层发生的挤压作用, 载荷垂直作用于冰晶生长方向, 本试验依托具备恒温控制系统的单轴压缩设备, 在环境与试样温度均严格保持为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的条件下, 控制加载路径始终垂直于冰晶生长方向进行单轴压缩, 以期在宏观层面真实模拟极地低温环境下船-冰相互作用的压缩行为。

在单轴压缩试验中, 冰样的最大静态抗压强度由测试系统记录的峰值载荷决定, 其计算公式为:

$$\sigma_c = \frac{F_{max}}{A}, \quad \backslash * \text{MERGEFORMAT (1)}$$

式中, σ_c 为冰试样的最大静态抗压强度; F_{max} 为试验过程中施加的最大破坏压力; A 为试样的受载横

截面积。

加载期间, 冰样的名义应变率定义如下:

$$\varepsilon = \frac{v}{L_0}, \quad \backslash * \text{MERGEFORMAT (2)}$$

其中, ε 为试验设定的名义应变率, v 为试验机的恒定下压加载速率, L_0 为冰样在压缩前的初始高度。

基于测试所得的应力-应变曲线, 结合材料的线弹性特征, 可通过下式计算得到冰的等效弹性模量:

$$E_e = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}, \quad \backslash * \text{MERGEFORMAT (3)}$$

其中, E_e 指代冰样的等效弹性模量, $\Delta\sigma$ 与 $\Delta\varepsilon$ 分别对应于弹性变形阶段内, 选定线性区间的应力增量和与之对应的应变增量。为消除试验初期系统接触间隙闭合及端部局部压碎引起的初始非线性位移干扰, 本文在提取等效弹性模量时, 参考了国际岩石力学学会对于脆性材料弹性参数测试的建议方法, 统一选取应力-应变曲线上最接近直线的稳定线弹性区段, 该区段在本文的实验数据中通常位于峰值抗压强度 σ_c 的 20%~50% 区间内, 进行斜率计算, 从而确保了所提取弹性模量的准确性与可靠性。

为深入评估激光对冰体强度的劣化作用, 并全面探究冰样在不同加载速率下的力学响应机制, 本试验将试样严格划分为未受激光作用的常规冰样与经激



图 4 激光击穿后冰样效果。(a) 激光入射口状态;(b) 正面裂纹状态;(c) 激光出射口状态

Figure 4 The effect of the ice sample after laser breakdown. (a) State of the laser entrance; (b) state of the front cracks; (c) state of the laser exit.

光击穿处理的冰样两个对照组。试验在 $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 区间内设定了 9 个名义应变率梯度, 且为确保测试结果的统计学可靠性并减小偶然误差, 每种应变率工况下的单轴压缩试验均独立重复进行 6 次。

3 激光破冰诱导下淡水冰的破坏演化对比

通过单轴压缩试验, 对比分析激光破冰冰样与完整冰样在不同加载条件下的破坏演化过程。

3.1 激光与冰作用现象

冰样在持续的激光照射下发生相变, 受激光热量影响, 光斑中心区域的冰晶结构迅速瓦解为液态水, 部分水被激光蒸发, 另有部分沿入射口溢出。激光束在约 42 s 内完全穿透 200 mm 厚的冰样, 内部最终形成直径约 8 mm 的贯穿性圆柱孔洞。同时, 受瞬态热应力及冰内融解气体膨胀逸出的影响, 孔道周边优先成核形成了微气孔及雾化热损伤区。

穿透完成后, 冰样表现出差异化的局部损伤特征。在激光入射口图 4 (a), 由于优先承接大量排溢融水, 流体在重力作用下沿表面流淌并重新冻结, 形成明显的熔融沉积通道, 且孔口周围萌生出“十字形”宏观裂纹; 在激光出射口图 4 (c), 因绝大部分融水已从入射口排出, 该处无明显高温水流痕迹, 但在热应力与微结构作用下, 孔边缘呈现波纹状形貌并向外侧辐射生成裂纹; 在冰样正面及内部图 4 (b), 清晰可见沿贯穿孔道延展的复杂连通裂纹网络与大面积热损伤区。上述由激光诱发的孔洞、熔融重结晶层及多尺度裂纹, 严重破坏了冰体的初始完整性。在后续的单轴压缩加载中, 这些特征将直接作为宏微观初始缺陷引起显著的应力集中, 为裂纹的进一步起裂与失稳扩展

提供先决条件, 进而主导冰样的最终破坏模式。

需要明确的是, 激光预处理对冰体的劣化机制包含两个核心维度: 首先是热学相变机制, 高能量密度的激光束导致作用区冰体迅速升温并发生熔化或气化, 形成宏观贯穿孔洞, 导致有效承载面积直接削减; 其次是力学损伤机制, 激光作用产生的瞬态极端温度梯度在孔周诱发了显著的不均匀热应力, 当局部应力超过冰晶间的胶结强度时, 便引发应力释放并伴随微裂纹的萌生与扩展。因此, 冰体承载能力的断崖式下降, 本质上是激光诱导的宏观相变缺陷与微观热应力损伤共同作用的结果。

3.2 激光破冰前后韧性破坏特征对比

在应变率为 $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 的低应变加载条件下, 两组试样均表现出典型的韧性破坏特征, 但在破坏演化过程与形态上呈现出显著的差异。如图 5(a)-(d)所示, 完整冰试样在加载过程中的破坏主要由均匀的蠕变变形与微裂纹形核主导。随着压缩的进行, 试样内部萌生大量沿晶裂纹并交替扩展为翼型裂纹。此时裂纹虽未发生失稳贯穿, 但裂纹界面的相对滑移促使试样产生显著的水平胀裂, 宏观上表现为随机分布的微裂纹充分发展, 试样内部出现大面积的乳白色损伤区, 最终达到裂纹形核与蠕变的临界状态而发生整体性碎裂。

相比之下, 如图 5(e)-(h)所示, 激光预处理冰样的破坏形态并未表现出全局性的裂纹弥散, 而是集中体现于孔洞周边的局部定向演化。由于贯穿性孔洞及周边热损伤区的存在打破了内部应力场的均匀性, 在轴向压缩作用下, 应力高度集中于孔洞赤道部周围。该区域优先发生显著的局部蠕变与塑性屈服, 宏观表现为孔洞受压变形并逐渐被压扁。这种围绕预制孔洞的剧烈局部变形有效吸收了大部分应变能, 在很大程

度上抑制了试样其他区域微裂纹的随机萌生与扩展。

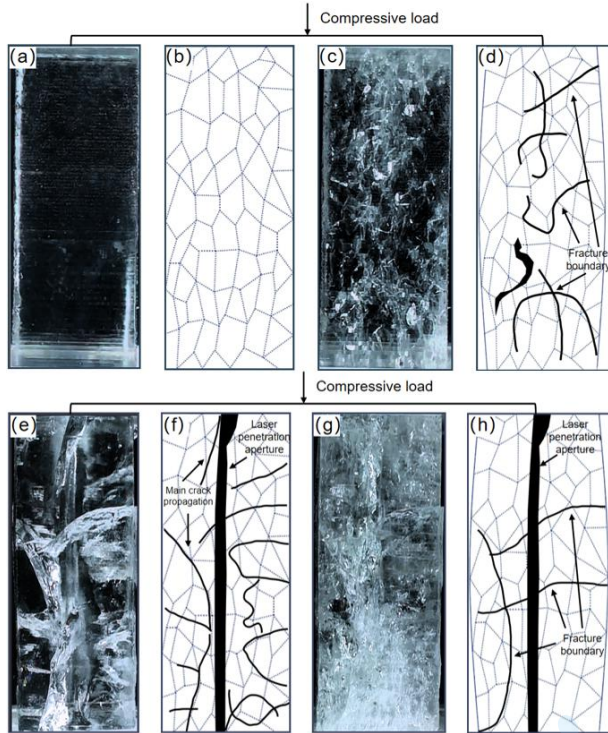


图 5 韧性破坏特征对比。(a) 激光破冰后冰样; (b) 冰样初始裂纹; (c) 韧性破坏后; (d) 韧性破坏后裂纹状态; (e) 未经激光作用冰样; (f) 冰样初始无裂纹; (g) 未经激光作用韧性破坏后; (h) 未经激光作用韧性破坏后裂纹状态

Figure 5 Comparison of ductile failure characteristics. (a) Ice sample after laser breaking; (b) initial crack of the ice sample; (c) after ductile failure; (d) crack state after ductile failure; (e) ice sample without laser treatment; (f) initial ice sample without crack; (g) after ductile failure without laser treatment; (h) crack state after ductile failure without laser treatment.

这一现象表明, 激光破冰处理使冰体的韧性破坏机制, 由完整冰的微裂纹随机均布与整体鼓胀, 显著转化为由宏观初始缺陷主导的局部失稳与压溃。

3.3 激光破冰前后脆性破坏特征对比

在 $5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 的相对高应变率快速加载条件下, 冰体内部蠕变变形对集中应力的释放作用可忽略不计, 裂纹扩展在缺陷演化中占据了绝对的主导地位, 两类冰样均表现出典型的脆性破坏特征, 但在形变与失效形态上存在显著差异。如图 6(a)-(d)所示, 完整冰试样在快速压缩过程中呈现出微裂纹高度随机分布的状态。由于试样内部缺乏占据主导地位的初始宏观缺陷, 裂纹萌生点极为分散且扩展路径毫无规律。

在持续的相对高应变率加载下, 这些弥散的微裂纹在

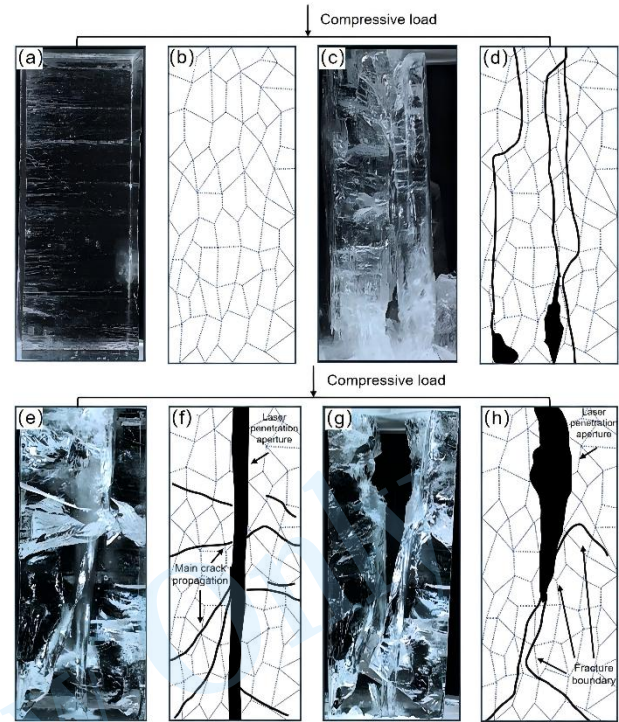


图 6 脆性破坏特征对比。(a) 激光破冰后冰样; (b) 冰样初始裂纹; (c) 脆性破坏后; (d) 脆性破坏后裂纹状态; (e) 未经激光作用冰样; (f) 冰样初始无裂纹; (g) 未经激光作用脆性破坏后; (h) 未经激光作用脆性破坏后裂纹状态

Figure 6 Comparison of brittle failure characteristics. (a) Ice sample after laser breaking; (b) initial crack of the ice sample; (c) after brittle failure; (d) crack state after brittle failure; (e) ice sample without laser treatment; (f) initial ice sample without crack; (g) after brittle failure without laser treatment; (h) crack state after brittle failure without laser treatment.

短时间内同时起裂扩展, 但未能有效交汇形成贯穿试样的宏观主裂纹。最终, 完整冰样表现为无明显塑性变形先兆的突发性失效, 宏观上呈现出碎片尺寸不一、路径极不规则的整体碎裂破坏。

形成显著对比的是, 如图 6(e)-(f)所示, 激光预处理冰样在相同载荷条件下表现出极强的缺陷主导与定向裂纹扩展特征。激光作用生成的贯穿性孔洞作为极其显著的初始宏观缺陷, 彻底改变了冰体内部的应力场分布。在轴向压缩作用下, 裂纹优先且迅速地从激光孔壁的局部应力集中极值处萌生。随后, 在裂纹扩展占主导的脆性机制驱动下, 主裂纹分别沿平行和垂直于加载轴的方向发生稳定且快速的扩展, 并最终相互交汇, 形成规则的“十字形”贯穿裂纹。这一现

象充分证实, 激光贯穿孔洞具备极强的定向引裂能力, 平, 整体承载力表现出极度的疲软。

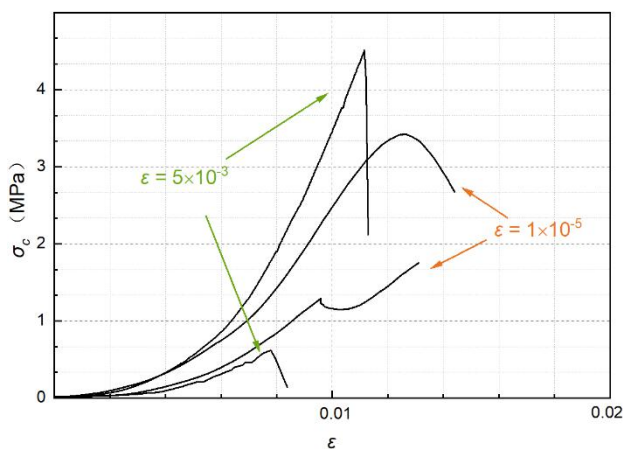


图 7 应力-应变曲线对比

Figure 7 Comparison of stress-strain curves.

能够有效约束并引导冰体内部的裂纹演化与破断路径。通过这一机制, 激光破冰处理将冰样的相对高应变率脆性失效模式, 由完整冰的裂纹随机弥散与整体无序碎裂, 成功转化为由宏观缺陷精确引导的规则劈裂。

4 激光破冰前后单轴压缩力学性能对比

为研究激光破冰的实际卸载效果, 通过单轴压缩试验 108 个冰样的有效数据从应力-应变曲线、最大静态抗压强度、以及等效弹性模量三个维度, 全面揭示激光穿透孔洞对冰力学性能的削弱机制。

4.1 激光破冰前后的应力-应变曲线对比

图 7 给出了两类淡水冰试样在不同应变率下典型的单轴应力-应变曲线。整体对比可见, 激光预处理在冰体内部诱发的贯穿孔洞及热损伤网络大幅削弱了其等效弹性模量与宏观承载效能。在低加载速率下, 两类冰样均呈现出带有塑性应变软化特征的韧性破坏曲线。完整冰样在达到应力峰值前具有稳定的上升段, 越过峰值后应力缓慢下降并逐渐趋于收敛, 无应力骤降现象。相比之下, 激光作用后的冰样虽维持了韧性破坏的整体走势, 但其抗变形与抗蠕变能力严重退化。表现在曲线上, 其屈服点显著提前, 峰值压缩强度大幅降低, 且在峰后的应变软化阶段, 由于内部晶界滑移与损伤加剧, 应力被持续压制在极低位水

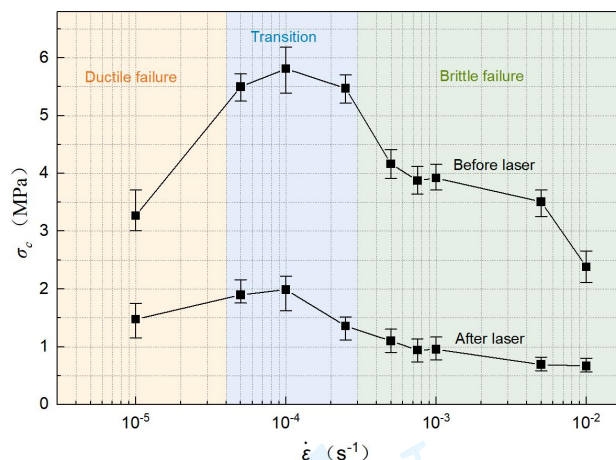


图 8 应变率对最大静态抗压强度的影响对比

Figure 8 The influence of strain rate on the maximum static compressive strength.

在高加载速率下的脆性破坏模式中, 两者的曲线形态差异更为剧烈。完整冰样的应力随应变近似线性急剧增加, 达到强度极值后应力瞬间骤降为零, 表现出理想的突发性宏观脆断特征。而激光预处理不仅使得冰样的脆断阈值锐减, 更显著改变了其失效路径, 受压过程中, 曲线在达到最终破坏前出现剧烈的局部破碎与应力跌落现象。这种应力起伏深刻揭示了激光预制的初始孔洞及其周围微裂纹在荷载作用下发生提前失稳, 诱发了局部的挤压碎裂与应力重分布。宏观上表现为冰体以更低的载荷阈值、更明显的局部破碎特征, 最终走向彻底的破碎失效。

4.2 应变率对最大静态抗压强度的影响对比

冰样的最大静态抗压强度 σ_c 可由单轴压缩应力-应变曲线的峰值直接提取。根据图 8 所示的 σ_c 的变化规律, 两类冰样的受压破坏过程均可划分为三个典型阶段: 韧性区 (Ductile failure)、韧-脆过渡区 (Transition) 和脆性区 (Brittle failure)。整体而言, 抗压强度随应变率的演化呈现出显著的非线性特征。在韧性区 ($\epsilon \leq 5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$), 由于内部蠕变变形占据主导, 强度表现出应变率硬化特征; 当应变率升至 ($5 \times 10^{-5} \sim 3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$) 时, 冰体进入韧-脆过渡区, 微裂纹扩展与蠕变松弛效应发生动态竞争, 抗压强度在此区间内达到极值; 随后进入相对高应变率的脆性

区 ($\dot{\varepsilon} \geq 3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$), 裂纹失稳扩展成为主导机制, 强度随应变率增大而回落, 表现为应变软化。

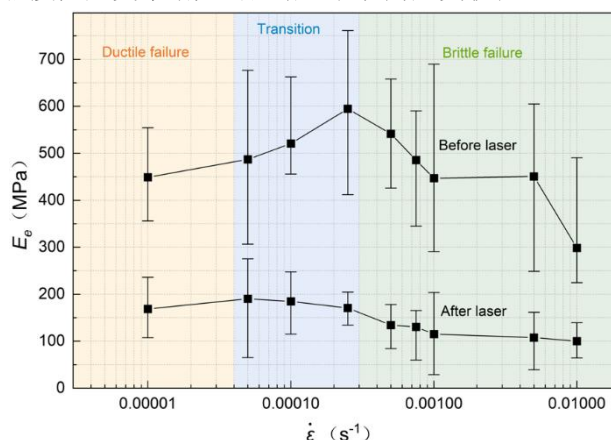


图 9 应变率对等效弹性模量的影响对比

Figure 9 The influence of strain rate on the effective elastic modulus.

深入对比激光作用前后的试验曲线发现, 尽管两类冰样在各破坏阶段的临界应变率阈值基本保持重合, 但激光热冲击导致冰体的宏观极限承载能力发生了严重劣化。在相同应变率下, 完整冰样的峰值强度曲线始终处于高位, 其最大静态抗压强度的最高均值 (过渡区) 与最低均值 (脆性区末端) 分别为 5.812 MPa 和 2.384 MPa。而经历激光定点穿透后, 内部演化出的贯穿孔洞及周边密集的热损伤微裂纹网络严重割裂了冰晶结构的完整性, 导致对应强度均值骤降至 1.990 MPa 和 0.669 MPa, 整体强度的降幅高达 65.8 %~71.9 %。这种力学响应特征表明, 激光初始损伤大幅削减了压碎冰体所需的绝对机械载荷, 但是并未从根本上改变冰体在不同加载速率驱动下的韧-脆破坏演化机制。

4.3 应变率对等效弹性模量的影响对比

冰样的等效弹性模量 E_e 反映了材料抵抗初期弹性变形的能力, 通常可由单轴压缩应力-应变曲线上达到最大应力前的稳定线弹性段斜率来确定。如图 9 所示, 两类冰样的等效弹性模量随加载应变率 $\dot{\varepsilon}$ 的演化规律表现出高度的一致性, 均呈现出显著的“先增后减”非线性趋势。在较低应变率的韧性区, 随着加载速率的提高, 冰体内部位移及变形的松弛时间缩短, 表现出弹性模量增大的硬化现象; 当进入韧-脆过渡区时, 等效弹性模量达到极大值, 但受微裂纹随机形核与蠕变变形相互竞争的影响, 该区间内的数据离散

性最为显著; 随后进入相对高应变率的脆性区, 由于微裂纹的迅速扩展与贯穿占据主导, 材料的结构化软化导致弹性模量逐渐回落。

尽管弹性模量随应变率的演化趋势保持一致, 但对比激光作用前后的测试结果可以发现, 激光热冲击导致冰体的宏观力学刚度发生了极为严重的退化。未经激光处理的完整冰样, 其结构致密, 等效弹性模量处于较高水平且波动较大, 其最高与最低均值分别为 594.784 MPa 和 298.428 MPa; 而历经激光穿透后, 内部演化出的贯穿孔洞与热损伤微裂纹网络极大地削弱了材料的有效承载截面, 导致对应均值分别骤降至 190.113 MPa 和 100.223 MPa, 各应变率下的整体降幅高达 66.4 %~68.0 %。此外, 激光处理后冰样弹性模量的离散程度明显减小, 这表明激光诱导的巨大宏观初始缺陷在受压变形中起到了绝对的控制作用, 掩盖了冰晶内部原生微小缺陷的随机性, 使得冰体不仅宏观刚度急剧下降, 且力学失稳行为更具确定性, 为后续降低破冰能耗提供了可靠的结构弱化基础。

5 结论

通过对完整淡水冰与激光预处理淡水冰在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境下的单轴压缩对比试验, 测量了 $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 宽应变率区间内两类冰样的压缩强度、破坏模式与等效弹性模量, 研究了激光宏观初始缺陷对冰体受压失效机理的转换作用。试验结果表明, 两类冰样均发生了明显的韧-脆转化过程, 其最大静态抗压强度与等效弹性模量随应变率的增加均呈现“先增后减”的非线性演化规律, 并在韧-脆过渡区间内达到峰值。这种响应特征揭示了冰体物理机制随加载速率演化的客观规律。对于极地船舶破冰等常规中低应变率场景, 建议在载荷预测中充分考量冰体的韧-脆转化规律及其对应的软化特征, 从而与极高应变率下的动态响应研究形成有效互补, 为不同工况下的工程应用提供更精准的力学判据。激光处理大幅削减了冰体的绝对承载力, 但并未改变导致冰体力学行为由蠕变松弛主导向微裂纹扩展主导转换的临界应变率阈值。

根据试验过程中冰样裂纹的发展特征以及应力-应变曲线波动形貌, 可明确激光破冰诱发的贯穿孔洞、热损伤区及伴生微裂纹极大地改变了冰体的宏观失效路径。在韧性破坏模式下, 完整冰表现为整体鼓胀

变形与微裂纹的随机分布,而激光破冰试样因局部应变能吸收,破坏演化转化为由孔洞主导的局部蠕变变形与失稳压溃;在脆性破坏模式下,完整冰表现为不规则失效与随机碎裂,而激光孔洞展现出极强的定向引裂能力,裂纹精准沿孔壁局部应力集中处萌生,并最终交汇形成规则的“十字形”贯穿主裂纹。

通过单轴力学参数的定量对比,证实了激光热冲击对冰体承载效能的剧烈劣化作用。相比于完整冰样

较高的承载基数与数据离散性,激光预处理冰样受内部孔洞及热损伤网络的严重割裂,其最大静态抗压强度较完整冰样大幅下降了 65.8 %~71.9 %,等效弹性模量亦同步折减了 66.4 %~68.0 %。这种力学性能的断崖式衰减及数据波动范围的缩小充分表明:激光预制缺陷极大降低了压碎冰体所需的机械载荷与刚度,使冰体的受压失稳由随机性破坏转变为受缺陷控制的确定性破坏。

参考文献

- 1 Liu Y J, Lu Y, Xue Y Z, et al. Prediction of navigation risks in the Arctic Northeast Passage based on Bayesian and neural networks. *Reliab Eng Syst Saf*, 2026, 267: 111791
- 2 Lu Y, Jiang Y T, Liu Y J, et al. A risk analysis model for Arctic escort operations based on STPA and Bayesian Networks. *Ocean Engineering*, 2026, 353: 124782
- 3 Yuan G Y, Ni B Y, Wu Q G, et al. Ice breaking by a high-speed water jet impact. *J Fluid Mech*, 2022, 934: A1
- 4 Wu Q G, Zhang C X, Ni B Y, et al. Numerical study on the damage of floating ice by high-pressure bubble loads. *Eng Anal Bound Elem*, 2024, 169: 106041
- 5 Böhm A M, Herrnring H, von Bock und Polach F. Data from uniaxial compressive testing of laboratory-made granular ice. *Data Brief*, 2022, 42: 108236
- 6 Shazly M, Prakash V, Lerch B A. High strain-rate behavior of ice under uniaxial compression. *Int J Solids Struct*, 2009, 46(6): 1499–1515
- 7 Peng S C, Wang W S, Wu M Y, et al. Dynamic uniaxial compressive strength of freshwater ice under strain rates: An energy-based strength criterion and damage model. *Case Stud Constr Mater*, 2025, 23: e05114
- 8 Schulson E M. Brittle failure of ice. *Eng Fract Mech*, 2001, 68: 1839–1887
- 9 Timco G W, Weeks W F. A review of the engineering properties of sea ice. *Cold Reg Sci Technol*, 2010, 60: 107–129
- 10 Schulson E M, Gratz E T. The brittle compressive failure of orthotropic ice under triaxial loading. *Acta Mater*, 1999, 47(3): 745–755
- 11 Batto R A, Schulson E M. On the ductile-to-brittle transition in ice under compression. *Acta Metall Mater*, 1993, 41(7): 2219–2225
- 12 Kim H, Keune J N. Compressive strength of ice at impact strain rates. *J Mater Sci*, 2007, 42: 2802–2806
- 13 Wang Q K, Liu Y B, Lu P, et al. The mechanical properties of gas-enriched sea ice. *Cold Reg Sci Technol*, 2025, 239: 104576
- 14 Li Z J, Zhang L M, Lu P, et al. Experimental study on the effect of porosity on the uniaxial compressive strength of sea ice in Bohai Sea. *Sci China Tech Sci*, 2011, 54(9): 2429–2436
- 15 Wang Q K, Li Z J, Lei R B, et al. Estimation of the uniaxial compressive strength of Arctic sea ice during melt season. *Cold Reg Sci Technol*, 2018, 151: 9–18
- 16 Potter R S, Cammack J M, Braithwaite C H, et al. A study of the compressive mechanical properties of defect-free, porous and sintered water-ice at low and high strain rates. *Icarus*, 2020, 351: 113940
- 17 Han H W, Li Z J, Huang W F, et al. The uniaxial compressive strength of the Arctic summer sea ice. *Acta Oceanol Sin*, 2015, 34(1): 129–136
- 18 Chen X D, Wang A L, Ji S Y. Brittle-ductile transition mechanism and failure mode of sea ice under uniaxial compression (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2018, 48(12): 124601 [陈晓东, 王安良, 季顺迎. 海冰在单轴压缩下的韧-脆转化机理及破坏模式. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2018, 48(12): 124601]
- 19 Snyder S A, Schulson E M, Renshaw C E. Effects of prestrain on the ductile-to-brittle transition of ice. *Acta Mater*, 2016, 108: 110–127
- 20 Wang Q, Liu K, Leppäranta M, et al. Microcrack evolution and damage mechanisms of natural ice under ductile compressive strain revealed by acoustic emission. *Eng Fract Mech*, 2026, 336: 111949
- 21 Chi C, Zhang Y H, Tang Y, et al. Research on cracking behavior of ice specimens containing single and double flaws under uniaxial compression. *Ocean Eng*, 2025, 342: 122938
- 22 Xu Z Y, Chang H R, Ren F Q, et al. Sea ice crack characteristics and ductile-brittle transition mechanism under low velocity impact. *J Mar Sci Eng*, 2025, 13(12): 2259
- 23 Han H M, Shen L, Liu J Q, et al. Experimental and numerical study of the uniaxial compressive strength of ice with initial fibrous pore: Effects of temperature and loading rate. *J Cold Reg Eng*, 2024, 38(3): 04024024
- 24 Zhang Y, Lu Y, Xiao Z M, et al. An experimental study of fiber laser power effects on icebreaking efficiency in clear ice at different temperatures. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 280: 128435
- 25 Zhen Z K, Shao K K, Song M J, et al. An experimental study on the effect of CO₂ laser powers on melting characteristics of clear ice part I: Horizontal irradiation. *Appl Therm Eng*, 2024, 248: 123208

- 26 Yang S, Yang Y Y, Zhang J Y, et al. Laser-induced cracks in ice due to temperature gradient and thermal stress. *Opt Laser Technol*, 2018, 102: 115–123
- 27 Zhu G D, Zhang D H, Zhang L, et al. Laser-induced ice breaking and water penetration in extreme weather for precise rubber deposit removal on airport runways. *Case Stud Constr Mater*, 2026, 24: e05704
- 28 Huo H D, Ding Y, Ma S M, et al. Integrated laser pre-treatment and impact loading method for enhanced underwater icebreaking. *Appl Therm Eng*, 2026, 287: 129463

The comparative study on failure mode and strength characteristics under uniaxial compression before and after laser ice-breaking

XUE YanZhuo¹, ZHANG Yang¹, LU Yang¹, & NI BaoYu¹

¹ College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

Under various compressive strain rates, freshwater ice fails in different modes and exhibits a brittle-ductile transition. To investigate the deterioration effect of initial laser defects on the mechanical properties of ice and the mechanism behind the brittle-ductile transition, comparative uniaxial compression tests were performed on intact freshwater ice and laser-pretreated freshwater ice under a controlled low-temperature environment of -20°C . The ice samples used in the experiments were artificial columnar freshwater ice prepared in the laboratory. In the experiments, the samples with uniform dimension of $80\text{ mm}\times 80\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ were penetrated at a fixed point using a fiber laser, and were applied compressive load across to the grain columns. Thus, the uniaxial compressive strength and mechanical responses of the two types of ice samples under different loading rates were obtained. The strain rate applied during the experiments ranged from 1×10^{-5} to $1\times 10^{-2}\text{ s}^{-1}$. Due to the variation of strain rates under different loading rates, both types of ice samples exhibited three different failure stages: ductile failure, brittle-ductile transition, and brittle failure. Under low loading rates when the ice was in a ductile failure mode, the intact ice showed micro-crack dispersion and global bulging, while the laser-pretreated ice samples absorbed energy through local creep deformation around the hole, eventually presenting a local instability and crushing dominated by macroscopic defects. When the loading rate was high and the ice failed in a brittle mode, the intact ice sample formed a random spalling failure due to disordered crack propagation. In contrast, the laser hole exhibited a strong directional crack-guiding ability, enabling cracks to develop stably along the hole wall and intersect to produce regular penetrating primary cracks, forming a "cross-shaped" splitting failure. The above experimental results also show that the laser thermal shock did not change the strain rate range where the brittle-ductile transition occurs, but greatly weakened the ultimate bearing capacity of the ice. Over the entire strain rate range, the maximum static compressive strength and effective elastic modulus of the laser-pretreated ice samples decreased significantly by 65.8%–71.9% and 66.4%–68.0%, respectively, compared to the intact ice samples, and the dispersion of the failure strength was significantly reduced.

laser ice-breaking, uniaxial compression strength, failure mode, brittle-ductile transition