论文

海冰在单轴压缩下的韧-脆转化机理及破坏模式

陈晓东¹, 王安良², 季顺迎^{1*}

1. 大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116023;

2. 国家海洋环境预报中心国家海洋局海洋灾害预报技术研究重点实验室, 北京 100081

*联系人, E-mail: jisy@dlut.edu.cn

收稿日期: 2018-03-27; 接受日期: 2018-05-08; 网络出版日期: 2018-10-08

国家自然科学基金(编号: 41506109, 51639004)和国家重点研发计划(编号: 2016YCF1401505)资助

摘要 海冰的破坏模式在不同加载速率下呈现出韧-脆转化特征. 为研究海冰的韧-脆转化机理, 本文对渤海东北部海域的平整冰进行了现场单轴压缩试验. 该试验采用的海冰为典型的h2型柱状冰, 其盐度变化范围为5.5‰–7.4‰, 试样温度在−15°C至−18.3°C之间. 试验中对几何尺寸为50 mm×50 mm×107 mm的长方体试样施加垂直于生长方向的压缩载荷, 由此得到海冰在不同加载速率下的单轴压缩强度. 在试验过程中所采用的应变率区间为 4.5×10^{-5} – 7.5×10^{-3} s^{−1}. 由于在不同加载速率下海冰应变率的不同, 海冰呈现出3种不同的破坏模式: 在加载速率较低时, 海冰强度随加载速率的提高而增大, 海冰中裂纹尖端的应力集中通过蠕变作用释放而抑制了裂纹扩展, 最终呈现为韧性破坏模式; 当应变率在 9×10^{-4} – 5×10^{-3} s^{−1}区间时, 海冰内部的裂纹能够沿主轴方向稳定生长并产生贯穿整个试样的主裂纹, 形成劈裂破坏, 海冰则呈现为韧-脆转化破坏; 当加载速率较高时, 海冰试样的裂纹尖端无法稳定生长而产生斜向裂纹并构成碎裂破坏, 海冰则呈现为脆性破坏模式. 以上试验结果还表明, 每种破坏模式均有与之对应的强度-应变率关系, 且海冰在不同应变率下的破坏模式决定了其单轴压缩强度特征, 是其发生韧-脆转化的主导因素. 此外, 本文还对海冰在不同加载速率下等效弹性模量的变化规律进行了讨论分析.

关键词 海冰, 单轴压缩强度, 韧-脆转化, 破坏模式**PACS:** 46.50.+a, 46.35.+z, 62.20.Hg, 62.20.Mk, 83.80.Nb

1 引言

自然界中的海冰由晶体颗粒、卤水、空气等成分组成, 在压缩作用下的黏-弹-塑性本构关系使其在不同加载速率下表现出多种力学行为^[1,2]. 在工程实际中, 海冰从温度影响下的热胀效应(10^{-6} m/s)到水文气象影响下的漂移运动(10^{-1} m/s), 再到冰区中与船体间的相

互碰撞(10^1 m/s), 冰与结构之间的相对速度跨越了约7个量级^[3–5]. 现场实测数据表明, 加载速率是影响压缩强度的主要因素之一^[6–8].

Ashby与Hallam^[9]认为冰与岩石等脆性材料的内部通常存在着细小裂纹, 在施加载荷后裂纹逐渐扩展连通并最终形成材料破坏. Schulson团队^[10–12]在对含杂质极低的淡水冰压缩试验中观测到冰样内部形成清

引用格式: 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: 124601
Chen X D, Wang A L, Ji S Y. The study on Brittle-ductile transition mechanism and failure mode of sea ice under uniaxial compression (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2018, 48: 124601, doi: 10.1360/SSPMA2018-00083

晰的翼形裂纹(Wing Crack), 并认为该裂纹主导了脆性破坏过程. 与人工冻制的淡水冰相比, 盐水冰的孔隙率较高且冰晶为柱状, 在稳定加载下裂纹尖端通常沿晶间方向扩展并形成翼形裂纹^[13,14].

在较低的加载速率下, 海冰通过蠕变作用膨胀变形并形成韧性破坏. 但随着加载速率的提高, 逐渐表现出脆性破坏的特征^[15,16]. 通过对大量实测数据统计整理发现, 海冰在不同应变率下表现出由韧性破坏向脆性破坏转化的特点, 并且在韧-脆转换区间存在最高的压缩强度^[17-19], 由此可采用分段函数描述其压缩强度与应变率的对应关系^[15,20,21]. 海冰的韧-脆转化机制主要取决于裂纹尖端的应力状态. 在不同的加载速率下, 海冰的蠕变作用对其微裂纹尖端应力集中的释放程度有很大的差异, 进而导致裂纹的不同扩展方式^[22]. 根据位错动力学理论, 在不同应变速率下由于位错密度不同而改变了材料的应力分布状态及其强度^[23]. Li 等人^[24]在宽应变率区间上测试了海冰的单轴压缩强度, 结果表明在韧-脆转化区存在着最大压缩强度, 即应变率大于或小于这个区间都会降低海冰的压缩强度. 当冰处于更高应变率(10^{-1} – 10^2 s⁻¹)区间时, 压缩强度与压缩速率再次成正比关系^[25,26]. 虽然从破坏形式上韧-脆转化的过程已经得到普遍认可, 但在脆性区的压缩强度-应变率变化趋势上仍存在分歧^[27]. 特别是 Timco 与 Weeks^[7]在现场试验中从未得到与 Shulson 团队在试验室中得到相一致的结果. 人工冻制的冰在成分和结构上与真实的海冰存在着一定差异, 即使是现场采集的海冰在运输至实验室的过程中也会由于卤水的迁移而引起力学性质的变化.

在自然环境中, 海冰的脆性破坏受约束条件(厚度、摩擦系数、几何形状等)的影响表现出整体劈裂、局部挤压破碎等不同破坏模式^[28,29]. 同样在单轴压缩下, 海冰受端部约束与加载速率等因素影响会产生轴向与斜向两种裂纹形势(轴向裂纹即主裂纹平行于加载方向; 斜向裂纹即主裂纹与加载方向呈一定角度). 这主要由于断裂韧性及裂纹尖端的应力状态受加载速率影响而改变了裂纹生长走势^[30]. 在产生斜向裂纹时, 破坏屈服极限主要由破坏面之间的摩擦力决定; 而对于轴向裂纹则产生类屈曲形式的破坏^[14,31,32]. 当在试验中引入图像法测试海冰应变分布时, 局部应变数据得以对海冰表面裂纹扩展进行量化描述, 数据显示高速加载过程中裂纹通常在近加载面端产生并发展形

成断裂面^[27,33]. 对南极海冰单轴压缩后的破碎分形研究表明, 加载速率越高产生的压缩碎片尺寸越小^[34]. 相比轴向裂纹, 海冰以斜向裂纹破碎时产生的碎块体积更小, 说明海冰裂纹扩展方式与加载速率互相关联. 大量的模型试验与现场试验表明了海冰单轴压缩强度随应变率变化存在明显的韧-脆转化现象, 但并未能解释韧-脆转化区特别是脆性区海冰压缩强度与应变率呈负相关的原因.

为研究海冰在单轴压缩下的韧-脆转化机理及其对应的破坏模式, 本文在渤海东北部海域开展了海冰单轴压缩的现场试验, 研究不同应变率下海冰压缩强度的变化特征, 重点分析海冰的破坏模式与加载速率的对应关系及其对压缩强度的影响.

2 海冰采样地点及单轴压缩强度

海冰的力学性质与形成过程即采样点水文气象条件密切相关, 因此对海冰采样地的潮汐、气温等条件的了解有助于分析海冰强度特征.

2.1 试验海域

在渤海东北部鲅鱼圈海域白沙湾(北纬40°07'16", 东经121°57'36")的极地海洋工程野外试验场, 本文开展了海冰单轴压缩强度的现场试验. 该海域淡水注入较少, 海水盐度为33.2‰, 其接近于大洋海水盐度(34‰)而高于渤海海水的平均盐度(30‰). 海冰的力学性质与其形成过程密切相关. 试验前10 d及试验过程中的气温变化如图1所示. 本试验开展于2018年2月6日. 试验前该区域在较强冷空气影响下空气温度降至约-20℃. 气温在短暂回升至零上后再次回落至-18℃, 采样与试验均完成于第二次降温后.

海冰试验地点位于沿岸区域, 海冰具有典型的岸冰特点. 在海水、潮流作用下, 海冰会沿海岸线形成大面积的挤压堆积, 岸冰在搁浅后长时间裸露于空气中表面水分蒸发使其盐度大幅升高. 为此, 本文所选的取样点为距海岸线约500 m处, 枯潮期水深在5 m以上, 如图2所示. 海冰为平整冰, 其厚度为(22±2) cm, 冰晶结构及力学性质较均匀.

2.2 海冰的盐度特点

盐度是影响海冰压缩强度的重要影响因素, 同时

图 1 (网络版彩图)现场试验期间的气温变化
Figure 1 (Color online) Air temperature during field experiments.

图 2 (网络版彩图)取样地点的海冰特点
Figure 2 (Color online) The sea ice characteristics at collecting site.

盐度分布特征也能反映出海冰的类型与力学性质. 这里对取样点处海冰沿生长方向的盐度分布进行了测量, 结果如图3所示. 图中的盐度曲线表现出典型的C型分布, 即海冰上表面与冰水交界处的盐度高于海冰内部的盐度. 盐度分布反映出海冰类型为典型的平整冰, 变化范围在4.6‰–8.7‰之间.

在现场试验中, 气温与海冰盐度均为不可控因素. 在本文试验中, 海冰试样温度受气温影响在 -15°C 至 -18.3°C 之间变化. 在切割加工试样时, 去除上下表面的高盐度部分后, 海冰试样的盐度范围在5.5‰–7.4‰

图 3 (网络版彩图)海冰盐度随深度变化
Figure 3 (Color online) The salinity profile of level ice.

之间. 由于冰温与盐度的相对跨度较小, 海冰试样的卤水体积变化并不明显. 因此, 这里将忽略卤水体积对海冰力学性质的影响.

2.3 海冰的单轴压缩试验

当海冰与直立结构发生相互作用时, 其破坏形式以挤压破坏为主. 此时海冰的破坏模式及冰载荷大小均与海冰的压缩强度密切相关. 本试验采用了尺寸为截面积为 $50\text{ mm}\times 50\text{ mm}$, 长度为 107 mm 的长方体海冰试样, 如图4所示. 试验设备为自主研发的WDY-50kN型号便携式低温试验机. 其中横梁移动由伺服电机驱动, 可提供 $0.001\text{--}0.8\text{ mm/s}$ 的加载速度, 试验中力和位移的采样频率为 200 Hz . 考虑海冰与直立结构发生挤压破坏时, 冰载荷方向主要垂直于冰晶生长方向, 因此本试验沿水平方向(即垂直于冰晶生长方向)对试样进行加载. 在试样切割过程中, 由于加工精度与操作误差等原因, 试样的加载面并不完全垂直于加载力方向. 由于取向偏离, 试样的实际高度略小于 107 mm . 此外, 通过对试验中海冰试样形变和破坏过程的图像记录, 可分析海冰的破坏模式以及冰内裂纹的演变特性.

在海冰单轴压缩试验中, 海冰的单轴压缩强度可由试验中的最大加载力确定, 即:

$$\sigma_c = \frac{F_{\max}}{A_i}, \quad (1)$$

其中, σ_c 为海冰单轴压缩强度, $F_{\max}$ 为最大加载力, A_i 为海冰试样横截面积.

图 4 (网络版彩图)海冰单轴压缩试样. (a) 试样结构图; (b) 试样照片
Figure 4 (Color online) Sea ice samples in uni-axial compression test. (a) The sketch ice sample structure; (b) the sea ice sample photo.

海冰试样在加载过程中的名义应变率为

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v}{L_i}, \quad (2)$$

其中, $\dot{\varepsilon}$ 为海冰名义应变率, v 为加载速率, L_i 为海冰试样初始高度.

结合应力-应变关系, 通过海冰单轴压缩试验可对海冰的等效弹性模量进行计算, 即:

$$E_e = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}, \quad (3)$$

其中, E_e 为海冰的等效弹性模量, $\Delta\varepsilon$ 为应变变化量, $\Delta\sigma$ 为应力变化量.

3 海冰单轴压缩试验及数据分析

为研究应变率对海冰单轴压缩强度的影响, 这里对应变率 $\dot{\varepsilon}$ 在 $4.5 \times 10^{-5} - 7.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 范围内进行海冰单轴压缩试验, 并由此确定海冰的单轴压缩强度 σ_c 和等效弹性模量 E_e .

3.1 海冰单轴压缩时的应力-应变曲线

海冰在外力作用下发生形变, 其应力随着形变量的增加而增加. 当达到压缩强度 σ_c 后, 海冰发生屈服或破坏. 试样在不同应变率加载过程中, 应力-应变关系曲线明显地呈现出3种不同特征. 图5中给出了海冰在3种不同加载速率下单轴压缩的应力-应变曲线. 当应力达到最大值时, 海冰发生破坏, 其所对应的应力即为海冰的单轴压缩强度. 此外, 3种应力-应变关系均采用实线与虚线对破坏进行区分.

在低应变率下, 如 $\dot{\varepsilon} = 4.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 时, 应力随应变的

图 5 (网络版彩图) 典型单轴压缩下海冰应力-应变关系
Figure 5 (Color online) Typical strength-stress curves in uniaxial compression tests.

增加而缓慢上升, 并在达到压缩强度 σ_c 后逐渐下降. 此时海冰表现为典型的韧性破坏行为. 在高应变率下, 如 $\dot{\varepsilon} = 2 \times 10^{-3}$ 或 $\dot{\varepsilon} = 7.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 时, 海冰应力随应变的增加而升高, 并在达到最大值后突然消失. 此时海冰表现为典型的脆性破坏行为. 这两组脆性破坏中的应力-应变曲线特征并不相同. 当应变率 $\dot{\varepsilon} = 2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 时, 试样在临近 σ_c 时表现出较强的塑性. 当 $\dot{\varepsilon} = 7.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 时, 试样在破坏过程中出现了多个峰值并且在第3个峰值才达到 σ_c . 这说明该试样在加载过程中存在着多次破碎, 但由于前期破碎程度较小而并未导致整个试样完全破坏.

海冰内部由柱状体晶粒构成并且晶粒间存在着卤水与空气, 由此形成黏-弹-塑性的本构关系^[1,2]. 在低应变率下, 晶间的滑移位错得到充分发展而表现出较强的塑性; 随着应变率的提高, 晶粒本身发生挤压变形而使试样表现出较强的弹性. 此外, 从试样的应力-应变关系还可看出, 应变率对海冰的压缩强度 σ_c 和等效弹性模量 E_e 具有显著的影响.

3.2 应变率对海冰单轴压缩强度的影响

为分析应变率对海冰压缩强度的影响, 这里对应变率 $\dot{\varepsilon}$ 在 $4.5 \times 10^{-5} - 7.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 范围内海冰的压缩强度进行了测试, 由此得到的试验结果如图6所示. 其中海冰的压缩强度 σ_c 为 1.4–6.04 MPa, 而平均压缩强度 $\bar{\sigma}_c$ 在 1.5–4.8 MPa 之间. 当 $\dot{\varepsilon}$ 在 $1.8 \times 10^{-3} - 3.7 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 之间时, σ_c 存在最大值. 当 $\dot{\varepsilon}$ 低于该区间时, σ_c 随 $\dot{\varepsilon}$ 的增加而提高; 当 $\dot{\varepsilon}$ 高于该转化区间时, σ_c 则随 $\dot{\varepsilon}$ 的增加而降低. 此外, 在高加载速率下, 海冰的 σ_c 表现出更强的离散度. 其中由于试样加工精度问题所引起的加载力方向偏离也增加了试验结果的误差范围.

图 6 (网络版彩图) 应变率对海冰压缩强度的影响
Figure 6 (Color online) The compressive strength versus strain rate.

根据海冰压缩强度 σ_c 与应变率 $\dot{\varepsilon}$ 的对应关系, 可将海冰分为韧性区(Ductile Failure)、过渡区(Transition)与脆性区(Brittle Failure), 如图6所示. 由于海冰在不同破坏模式下的力学机理有很大差别, 由此形成了不同破坏模式下的压缩强度-应变率关系. 自然界中的海冰内部夹杂着卤水与空气等杂质. 在低加载速率下, 晶粒沿晶界间发生滑移位错, 使海冰呈现出较强的塑性. 此时, σ_c 主要由孔隙率、晶粒尺寸等因素决定. 在脆性区, 海冰的破坏主要依赖于裂纹尖端的应力状态. 因此, 在海冰在脆性区的 σ_c 主要受断裂韧性、弹性模量等因素的影响. 但这并不能充分解释 σ_c 在脆性区随 $\dot{\varepsilon}$ 的下降趋势, 这也是Timco与Frederking对 σ_c 这种变化特点产生质疑的主要原因^[7,17]. 对此, 本文将结合脆性区海冰试样的破坏模式对 σ_c 的变化特征进行分析.

3.3 应变率对海冰弹性模量的影响

为研究海冰受压过程中的应力-应变关系特征, 这里对不同加载速率下的等效弹性模量 E_e 进行确定. 图7中给出了弹性模量随应变率的变化规律. 对于脆性破坏的海冰试样, E_e 由应力加载稳定阶段的应力-应变关系确定. 在图5中, 当应变率为 $2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 时, 弹性模量可由应变在0.008–0.012范围内确定; 对于韧性破坏的试样, 则由塑性屈服前的应力-应变关系进行确定. 在图5中, 当应变率为 $4.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 时, 弹性模量则由应变在0.005–0.008范围内确定. 由此可确定出海冰在不同应变率下, 其弹性模量范围在1.5–8.2 GPa之间.

试验结果还进一步表明, 在低应变率下, 海冰的 E_e 随应变率的升高而增加; 当应变率超过 $5.6 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 时, E_e 随应变率的升高呈下降趋势. 这与海冰压缩强度随

图7 (网络版彩图) 应变率对弹性模量的影响

Figure 7 (Color online) The effective elastic modulus versus strain rate.

应变率的变化规律是一致的, 主要是由于不同加载速率下海冰破坏模式的差异所导致.

4 海冰在单轴压缩下的破坏模式

自然生成的海冰含有气泡、卤水, 甚至泥沙等杂质, 这些杂质无法嵌入冰晶结构中而以微小缝隙的形式存在于海冰内部. 在外载荷作用下, 这些细小的裂纹以不同方式发展并形成海冰的最终破坏形式. 本文将海冰受力简图与压缩过程中的实际录像信息相结合, 其中对试样部位的图像进行放大并通过图像处理提高了试样表面特别是裂纹位置的对比度. 海冰在单轴压缩下的破坏模式本质上是其内部微裂纹的生长方式, 这又由裂纹尖端的应力状态所决定. 依据海冰在不同加载速率下的破坏形式, 本文将其分为: 多裂纹韧性破坏(Ductile Failure)、劈裂破坏(Splitting Failure)及碎裂破坏(Spalling Failure).

4.1 海冰的多裂纹韧性破坏

海冰内部由柱状冰晶构成, 卤水与空气等成分在冰晶间形成“润滑”作用. 在压缩作用下冰晶的位错滑移使海冰表现出的黏-塑性并发生蠕变. 当海冰在较低加载速率作用下, 蠕变现象占据主导并最终形成韧性破坏. 在韧性破坏中由于没有宏观断裂产生, 海冰的加载力时程曲线通常较为平滑. 在压缩作用下, 海冰内部的细小裂纹成为初始裂纹(图8(a))并且在裂纹尖端形成应力集中. 随着加载力的逐渐增加, 试样不断发生变形, 裂纹尖端的应力集中达到临界值, 从而引起初始裂纹的首次生长并形成翼型裂纹, 如图8(b)所示. 海冰内部的微裂纹通常并不与加载方向完全平行, 而在单轴加载力的作用下裂纹尖端的应力状态更利于其在加载方向生长, 进而形成翼型裂纹. 翼型裂纹的形成在本质上是为裂纹发展过程进行“方向调整”. 自然形成的初始裂纹通常与加载方向呈一定的角度, 而压缩试样中的水平拉应力使得裂纹更有利于在竖直方向生长. 对于低加载速率下的海冰, 应力增加速度较慢从而使得裂纹尖端的应力集中在蠕变松弛作用下得以释放而无法持续生长. 在图8(c)中, 发生明显变形的海冰内部分布着多个翼型裂纹, 但在蠕变作用下裂纹最终停止生长, 从而不会发生脆性破坏.

图8(d)–(f)给出了试验过程中试样在不同时刻的

图 8 (网络版彩图) 压缩作用下海冰的多裂纹韧性破坏过程. (a) 初始裂纹; (b) 翼型裂纹形成; (c) 韧性破坏; (d) 第 10 s 冰样破坏状态; (e) 第 24 s 冰样破坏状态; (f) 第 150 s 冰样破坏状态; (g) 韧性破坏加载力时程曲线

Figure 8 (Color online) The ductile failure processes with multi-racks of sea ice under compression. (a) Initial crack; (b) wing crack; (c) ductile failure; (d) ice sample failure state at $t=10$ s; (e) ice sample failure state at $t=24$ s; (f) ice sample failure state at $t=150$ s; (g) time history of ice load in a ductile failure.

形变和破坏状态. 图 8(g) 中给出了对应时刻的加载力时程曲线. 图 8(d) 为试样在试验初期 ($t=10$ s) 的状态, 表面分布着一定数量的微裂纹. 当加载力达到最大值时, 试样中部已出现明显鼓胀形变, 并且试样表面的微裂纹大多已形成翼型裂纹 (如图 8(e)). 随着试样继续加载至第 150 s 时, 加载力已经明显下降并趋于稳定, 但此时试样表面的翼型裂纹并未继续发展, 而仅是裂纹开口有所增大 (如图 8(f)). 值得注意的是, 结合图 8(d) 中给出的冰晶方向能够看出, 微裂纹主要在晶间产生. 海冰的韧性破坏通过多条微裂纹共同发展形成, 在试验过

程中, 多条微裂纹同时或交替扩展, 因此加载力时程曲线相对比较平滑, 如图 8(g) 所示. 在该破坏模式下, 海冰加载力主要来源于冰晶间的滑移位错^[23]. 当加载速率提高时, 由于位错密度与应变率呈正比而表现出压缩强度与应变率之间的正相关关系.

4.2 海冰的劈裂破坏

在压缩过程中, 当加载速率增大后, 海冰试样内的应变率随加载速率的增加而增大. 此时翼型裂纹的尖端应力集中将无法通过蠕变作用完全释放. 裂纹会不断扩展从而形成一条贯穿试样的主裂纹. 如图 9 所示, 加载初期仍由微裂纹 (图 9(a)) 发展为翼型裂纹 (图 9(b)), 其与韧性破坏模式初期较为相似. 但在高应变率下, 裂纹尖端的应力进一步集中并使其总体沿加载方向不断扩展, 直至形成贯穿性主裂纹, 导致试样的劈裂破坏 (图 9(c)). 形成试样劈裂破坏所需的应变率要高于韧性破坏, 以获得足够的集中应力触发裂纹扩展. 此时蠕变作用仍能对试验过程起到一定的影响, 其应力-应变关系仍能呈现出明显的塑性行为, 如图 5 中 $\dot{\epsilon}=2\times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 对应的曲线. 该蠕变作用可使整个加载过程相对平缓, 但其又可使裂纹稳定生长至试样两端. 在该破坏模式下, 由于试样内部应力集中作用使其应力路径主要围绕裂纹处发展而形成屈服面^[23]. 内部应力的非均匀分布使其强度变化规律与多裂纹韧性破坏表现出明显区别.

图 9(d)–(f) 给出了海冰试样劈裂破坏的整个过程. 与图 8(e) 相似, 试样表面能够观测到多条翼型裂纹的形成 (如图 9(d)). 但随着荷载的增加, 裂纹会明显扩展 (如图 9(e)), 并最终形成一条贯穿整个试样的主裂纹致使试样劈裂破坏 (如图 9(f)). 在图 9(g) 给出的加载力时程曲线中, 海冰试样并未在加载力最大值时发生破坏, 而是表现出短暂的塑性形变后才发生劈裂. 这种曲线变化特点说明蠕变对裂纹尖端的应力集中进行了一定的释放. 从裂纹长度来看, 劈裂所产生的裂纹长度达到了最大值. 这意味着在破坏时瞬间产生了较高的界面能, 使试样在发生整体性劈裂破坏的瞬间加载力迅速消失.

4.3 海冰的碎裂破坏

在较为理想状态下, 翼型裂纹一般在试样中部产生并向两端发展. 在以往采用纯度较高的淡水冰试验

图 9 (网络版彩图) 压缩作用下海冰劈裂破坏过程. (a) 初始裂纹; (b) 翼型裂纹形成; (c) 主裂纹形成劈裂破坏; (d) 第 2.4 s 海冰状态; (e) 第 5 s 海冰破坏状态; (f) 第 5.75 s 海冰破坏状态; (g) 试样劈裂破坏过程中的加载力时程曲线

Figure 9 (Color online) The splitting failure mechanism of sea ice under compression. (a) Initial crack; (b) wing crack; (c) primary crack of splitting failure; (d) ice sample failure state at $t = 2.4$ s; (e) ice sample failure state at $t = 5$ s; (f) ice sample failure state at $t = 5.75$ s; (g) time history of ice load during a splitting failure.

中, 甚至能够观测到裂纹在试样内部的扩展情况. 然而, 自然界中的海冰含有大量杂质使其内部分布着大量类似于微裂纹的初始缺陷. 这在韧性破坏(图 8(f))与劈裂破坏(图 9(e))中均可观测到. 虽然这些裂纹并未主导冰样的破坏过程, 但也得到了不同程度的扩展. 也就是说, 劈裂破坏的裂纹并不一定由试样中部的微裂纹发展而来, 主导性的裂纹也可能产生于试样两端. 此外, 在劈裂破坏中观察到, 裂纹虽然能够穿透整个试样但仍与加载方向呈一定角度. 若初始裂纹靠近两端并与加载主向有很大的夹角, 该裂纹将无法贯穿试样

而会形成局部的碎裂破坏.

碎裂也是海冰与结构发生挤压接触时的一种常见破坏形式. 图 10(a)–(c)给出了碎裂过程的示意图. 当加载速率快到一定程度后, 海冰晶体间的位错和滑移引起的黏-弹性、黏-塑性、塑性等作用则可完全忽略. 此时微裂纹的尖端应力集中程度更高(如图 10(a)), 并迅速形成裂纹的扩展破坏以释放能量. 在单轴压缩中, 试样侧方向不存在约束, 因此裂纹在非“稳定”状态下更容易向侧面生长并形成斜向裂纹(如图 10(b)). 在断裂面形成后碎块脱落的同时, 第二条斜向裂纹也将开始发展(如图 10(c)). 多个斜向裂纹如此反复生成, 就造成了试样的多级局部碎裂破坏. 而根据 Griffith 对断裂中界面能的描述, 碎裂破坏中应变率的提高减小了碎块尺寸从而降低了压缩强度. 因此在该阶段中压缩强度与应变率呈负相关关系.

图 10(g) 为典型碎裂破坏中的加载时程曲线, 图 10(d)–(f) 给出了与之对应的海冰试样的破坏状态. 与其他两种破坏模式相比, 碎裂中的裂纹发展速度较快. 在加载至 $t = 2.4$ s 时, 试样右侧形成第一条斜向裂纹(图 10(e)). 该裂纹引起的破碎形成时程曲线中第一个峰值(图 10(g)). 随着继续加载, 在 $t = 2.9$ s 时, 试样左侧出现第二条斜向裂纹并形成试样整体破碎. 试验还进一步表明, 碎裂中的斜向裂纹与加载方向的角度随加载速率提高而增加. 这表明增加冰样碎裂后的碎块尺寸随加载速率的增加而减小. 这与对破碎尺寸分形研究的结果相一致^[33]. Qi 等人^[25]在更高的加载速率下, 甚至观测到了挤压破碎.

5 海冰破坏模式对压缩强度、弹性模量的影响

海冰在不同的加载速率下表现出不同的破坏模式, 并导致其压缩强度、弹性模量具有很大的差别. 这里针对不同加载速率下海冰的破坏模式及其对压缩强度、弹性模量的影响进行讨论.

5.1 应变率对海冰破坏模式的影响

在不同的应变率下, 海冰的破坏模式也在发生相应的转化. 将不同应变率下的海冰破坏模式统计后绘于图 11 中. 在低应变率阶段, 海冰破坏全部呈现出多裂纹韧性破坏模式; 当应变率增加到 10^{-3} s^{-1} 后, 破坏模

图 10 (网络版彩图) 压缩作用下海冰碎裂破坏过程. (a) 翼型裂纹; (b) 斜向裂纹; (c) 碎裂破坏; (d) 第 2.1 s 海冰破坏状态; (e) 第 2.4 s 海冰破坏状态; (f) 第 2.9 s 海冰破坏状态; (g) 碎裂破坏过程中的加载力时程曲线

Figure 10 (Color online) The spalling failure mechanism of sea ice under compression. (a) Wing cracks; (b) inclined crack; (c) spalling failure; (d) ice sample failure state at $t = 2.1$ s; (e) ice sample failure state at $t = 2.4$ s; (f) ice sample failure state at $t = 2.9$ s; (g) the curve of ice load versus time during spalling failure processes.

图 11 (网络版彩图) 应变率对海冰压缩破坏模式的影响

Figure 11 (Color online) The influence of strain rate on failure mode of sea ice.

式进入韧-脆转化阶段. 在该阶段中相同应变率下可能存在两种甚至三种破坏模式. 在应变率增加至 $3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 后, 虽然海冰发生的破坏为脆性破坏, 但仍呈现为劈裂

破坏或碎裂破坏两种形式. 随着应变率的继续增加, 破坏模式逐渐转化为碎裂破坏.

图 11 对海冰破坏模式的统计结果可很好地解释图 6 中压缩强度的离散性. 在韧性区, 由于破坏模式均呈现为多裂纹韧性破坏, 海冰压缩强度的离散性就相对较小; 在韧-脆转化区, 由于破坏模式存在很强的随机性, 海冰压缩强度也极为分散; 在脆性区, 海冰主要呈现为劈裂和碎裂模型, 其离散性也相对较强. 此外, 从图 11 还可以发现, 海冰破坏模式转化的应变率区间较大. 在海冰工程中, 一般会存在多种破坏模式共存的现象. 即便是在同一应变率下也不应简化为单一破坏模式. 因此单一的强度准则无法准确地描述海冰在单轴压缩下的破坏行为.

5.2 海冰破坏模式对压缩强度的影响

为分析海冰破坏模式对压缩强度的影响, 这里将不同应变率下的压缩强度及其所对应的 3 种破坏模式绘于图 12 中. 可以看出, 在多裂纹韧性破坏模式中, 压缩强度与应变率的对数呈线性关系; 在劈裂破坏模式下, 压缩强度处于最高值区域, 其随应变率的变化并不明显; 在碎裂破坏模式下, 海冰强度又随应变率的增加呈下降趋势.

海冰韧-脆转化本质上是不同应变率下蠕变松弛与裂纹尖端应力集中之间的“竞争”转化. 在韧性区, 虽然蠕变主导试样的屈服过程但仍需通过一定程度的微裂纹发展(图 8(e))来释放裂纹尖端的集中应力. 裂纹的这种短期“不完全发展”取代了长期蠕变作用而表现出较高的承载力. 随着应变率的提高则需要更多的裂纹扩展替代蠕变, 因此在该阶段压缩强度与应变率呈正相关.

图 12 (网络版彩图) 海冰破坏模式与压缩强度的对应关系

Figure 12 (Color online) The relationship between failure mode and compressive strength of sea ice.

当加载速率增加至一定程度时, 海冰破坏状态进入蠕变松弛与裂纹扩展“势均力敌”的局面, 此时试样形成劈裂破坏. 劈裂破坏实际上是一种较为理想的裂纹扩展-破坏过程, 也是韧-脆转化的表现形式. 在劈裂过程中可以观测到海冰试样内部多个微裂纹“闪动”并伴随裂纹扩展时“丝丝”的声音. 在试样破坏时会迸发出巨大声响, 且碎块可远距离飞溅. 在劈裂破坏中, 加载速率能够恰好触发裂纹扩展的条件并使其向试样两端稳定发展. 这时冰内断裂面的面积较大, 并释放出较高的能量, 从而形成了较高的压缩强度.

随着加载速率的进一步增大, 海冰的破坏过程则完全由裂纹扩展主导并形成碎裂模式的脆性破坏. 随着加载速率的增加, 裂纹与加载方向的角度逐渐增大. 这意味着断裂面积减小, 从而使破坏时的断裂能也较小, 由此降低了海冰的压缩强度. 简单地说, 碎裂过程使试样通过多次小型的局部破碎表成整体破坏, 从而降低了压缩强度. 因此, 在碎裂阶段, 海冰压缩强度随加载速率的增加而呈下降趋势.

5.3 海冰破坏模式对 E_c 的影响

本文测量的等效弹性模量中包含黏-弹性与弹性两部分引起的形变. 其中真实弹性形变并不受加载速率的影响, 因此等效弹性模量的变化主要体现了晶间位错引起的黏-弹性作用. 在多裂纹韧性破坏与劈裂破坏模式下, 等效弹性模量均随加载速率的增加而增大, 如图13(a)所示. 在韧性破坏中, 加载速率较为缓慢, 黏-弹性特征能够充分发展. 在劈裂破坏中, 裂纹需要扩展至试样的两个端面, 使得黏-弹性特征能够在整个试样内发展. 加载速率的增加将海冰试样的破坏过程缩短, 从而弱化了黏-弹性作用, 因此等效弹性模量呈上升趋势.

在碎裂破坏中, 黏-弹性作用区域主要集中在试样发生破坏的端部, 并且随着加载速率的增加该区域逐渐减小. 因此碎裂破坏中的 E_c 随应变率的增加而呈现降低的趋势. 此外, 由于碎裂破坏中的裂纹扩展较为不稳定, 从而使等效弹性模量较为离散.

将等效弹性模量与压缩强度间关系按不同破坏模式划分后如图13(b)所示. 在韧性破坏与碎裂破坏中, 弹性模量与压缩强度均呈正比关系. 其中韧性破坏的斜率较高. 然而, 对于韧-脆转化区间的劈裂破坏状态, 等效弹性模量与压缩强度并无明显关系.

6 结论

通过对渤海东北部海域海冰的单轴压缩现场试验, 测量了不同加载速率下海冰的压缩强度、破坏模式和等效弹性模量过程, 研究了不同应变率下海冰发生韧-脆转化的过程及形成机理. 试验结果表明, 应变率在 $9 \times 10^{-4} - 5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 范围内, 海冰发生韧脆转化, 并呈有较高的压缩强度. 当应变率低于或高于该范围时, 海冰分别呈韧性和脆性力学行为.

根据试验过程中冰样内裂纹的发展过程以及应力-应变曲线, 将海冰的受压破坏分成多裂纹韧性破坏、劈裂破坏与碎裂破坏3种模式. 在韧性破坏下, 压缩强度与应变率呈指数增长; 在劈裂破坏下, 压缩强度达到最大值, 但随应变率变化并不明显; 在碎裂破坏下, 压缩强度随应变率增加而下降.

通过海冰单轴压缩试验中的应力-应变关系, 可确定海冰的等效弹性模量. 受不同加载速率下海冰破坏模式的影响, 有效弹性模量与应变率的对应关系也呈现出相应的韧脆转化过程.

图 13 (网络版彩图)破坏模式对 E_c - σ_c 关系的影响. (a) 不同破坏模式下 E_c - $\dot{\epsilon}$ 对应关系; (b) 不同破坏模式下 E_c - σ_c 对应关系

Figure 13 (Color online) The influence of failure mode on E_c - σ_c relationship. (a) The E_c - $\dot{\epsilon}$ relationship under various failure modes; (b) the E_c - σ_c relationship under various failure modes.

致谢 感谢大连理工大学研究生李浩林、姜庆郁对现场海冰取样和试验测试工作的协助, 以及辽宁省海洋与渔业厅营口海洋监测站全体工作人员的大力支持.

参考文献

- 1 Sinha N K. Rheology of columnar-grained ice. *Exp Mech*, 1978, 18: 464–470
- 2 Sinha N K. Short-term rheology of polycrystalline ice. *J Glaciol*, 1978, 21: 457–474
- 3 Li Z J, Wang Y X. Design criteria of Bohai Sea ice-control engineering (in Chinese). *Ocean Eng*, 2000, 18: 61–64 [李志军, 王永学. 渤海海冰工程设计特征参数. *海洋工程*, 2000, 18: 61–64]
- 4 Yen Y C. Review of thermal properties of snow, ice and sea ice. Technical Report. Cold Regions Research and Engineering Laboratory Hanover, 1981
- 5 Su B, Riska K, Moan T. Numerical study of ice-induced loads on ship hulls. *Mar Struct*, 2011, 24: 132–152
- 6 Moslet P O. Field testing of uniaxial compression strength of columnar sea ice. *Cold Regions Sci Tech*, 2007, 48: 1–14
- 7 Timco G W, Weeks W F. A review of the engineering properties of sea ice. *Cold Regions Sci Tech*, 2010, 60: 107–129
- 8 Meng G L, Zhang M Y, Li Z J, et al. Study of the uniaxial compressive strength of the Bohai sea ice (in Chinese). *J Glaciol Geocryol*, 1987, 9: 329–338 [孟广琳, 张明远, 李志军, 等. 渤海平整冰单轴抗压强度的研究. *冰川冻土*, 1987, 9: 329–338]
- 9 Ashby M F, Hallam (Née Cooksley) S D. The failure of brittle solids containing small cracks under compressive stress states. *Acta Metall*, 1986, 34: 497–510
- 10 Cannon N P, Schulson E M, Smith T R, et al. Wing cracks and brittle compressive fracture. *Acta Metall Mater*, 1990, 38: 1955–1962
- 11 Schulson E M, Kuehn G A, Jones D A, et al. The growth of wing cracks and the brittle compressive failure of ice. *Acta Metall Mater*, 1991, 39: 2651–2655
- 12 Schulson E M. Brittle failure of ice. *Eng Fract Mech*, 2001, 68: 1839–1887
- 13 Gratz E T, Schulson E M. Brittle failure of columnar saline ice under triaxial compression. *J Geophys Res*, 1997, 102: 5091–5107
- 14 Renshaw C E, Schulson E M. Universal behaviour in compressive failure of brittle materials. *Nature*, 2001, 412: 897–900
- 15 Li Z J, Meng G L, Sui J X. The analysis of long-term compressive strength of Liaodong Bay sea ice (in Chinese). *Acta Oceanol Sin*, 1991, 13: 571–575 [李志军, 孟广琳, 隋吉学. 辽东湾海冰单轴压缩长期强度的初步分析. *海洋学报*, 1991, 13: 571–575]
- 16 Duval P. Creep and fabrics of polycrystalline ice under shear and compression. *J Glaciol*, 1981, 27: 129–140
- 17 Schulson E M, Buck S E. The ductile-to-brittle transition and ductile failure envelopes of orthotropic ice under biaxial compression. *Acta Metall Mater*, 1995, 43: 3661–3668
- 18 Schulson E M, Nickolayev O Y. Failure of columnar saline ice under biaxial compression: Failure envelopes and the brittle-to-ductile transition. *J Geophys Res*, 1995, 100: 22383–22400
- 19 Ince S T, Kumar A, Paik J K. A new constitutive equation on ice materials. *Ships Offshore Struct*, 2017, 12: 610–623
- 20 Shen W, Lin S Z. The strain-rate sensitivity of strength of Bohai sea one-year ice under uniaxial compression (in Chinese). *J Dalian Univ Technol*, 1984, 4: 45–50 [沈梧, 林树枝. 渤海东部一年冰单轴压缩强度的应变速率敏感性. *大连理工大学学报*, 1984, 4: 45–50]
- 21 Li F C, Meng G L, Zhang M Y. The influence of strain-rate on ice compressive strength (in Chinese). *Acta Oceanol Sin*, 1986, 8: 619–625 [李福成, 孟广琳, 张明元. 应力率对海冰单轴抗压强度的影响. *海洋学报*, 1986, 8: 619–625]
- 22 Jia B, Li J L, Pang B J, et al. Elastic-viscoplastic analysis of the tip field of a mode I quasi-static propagating crack under plane stress condition (in Chinese). *JME*, 2011, 47: 99–103 [贾斌, 李加雷, 庞宝君, 等. 平面应力 I 型准静态扩展裂纹尖端场的弹粘塑性分析. *机械工程学报*, 2011, 47: 99–103]
- 23 Zhao Y P. Modern Continuum Mechanics (in Chinese). Beijing: Science Press, 2016 [赵亚溥. 近代连续介质力学. 北京: 科学出版社, 2016]
- 24 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 Technol Sci*, 2011, 54: 2429–2436
- 25 Qi C, Lian J, Ouyang Q, et al. Dynamic compressive strength and failure of natural lake ice under moderate strain rates at near melting point

- temperature. *Lat Am J Solids Struct*, 2017, 14: 1669–1694
- 26 Wang A L, Xu N, Ji S Y. Characteristics of sea ice uniaxial compressive strength around the coast of Bohai sea (in Chinese). *Ocean Eng*, 2014, 32: 82–88 [王安良, 许宁, 季顺迎. 渤海沿岸海冰单轴压缩强度的基本特性分析. *海洋工程*, 2014, 32: 82–88]
- 27 Kim H, Keune J N. Compressive strength of ice at impact strain rates. *J Mater Sci*, 2007, 42: 2802–2806
- 28 Lu W, Lubbad R, Løset S, et al. Fracture of an ice floe: Local out-of-plane flexural failures versus global in-plane splitting failure. *Cold Regions Sci Tech*, 2016, 123: 1–13
- 29 Lu W, Lubbad R, Løset S. Out-of-plane failure of an ice floe: Radial-crack-initiation-controlled fracture. *Cold Regions Sci Tech*, 2015, 119: 183–203
- 30 Ji S Y, Liu H L, Xu N, et al. Experiments on sea ice fracture toughness in the Bohai Sea (in Chinese). *Adv Water Sci*, 2013, 24: 386–391 [季顺迎, 刘宏亮, 许宁, 等. 渤海海冰断裂韧度试验. *水科学进展*, 2013, 24: 386–391]
- 31 Fortt A L, Schulson E M. Velocity-dependent friction on Coulombic shear faults in ice. *Acta Mater*, 2009, 57: 4382–4390
- 32 Schulson E M. Low-speed friction and brittle compressive failure of ice: Fundamental processes in ice mechanics. *Int Mater Rev*, 2015, 60: 451–478
- 33 Lian J, Ouyang Q, 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. *Appl Sci*, 2017, 7: 495
- 34 Han H W, Lei R B, Li B R, et al. Study on the uniaxial compressive strength and crushing regulation of the landfast Antarctic sea ice in Austral summer (in Chinese). *Chin J Polar Res*, 2016, 28: 505–513 [韩红卫, 雷瑞波, 李丙瑞, 等. 夏季南极固定冰单轴压缩强度及试样破碎规律研究. *极地研究*, 2016, 28: 505–513]

The study on Brittle-ductile transition mechanism and failure mode of sea ice under uniaxial compression

CHEN XiaoDong¹, WANG AnLiang² & JI ShunYing^{1*}

¹ State Key Laboratory of Structure Analysis of Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China;

² Key Laboratory of Research on Marine Hazards Forecasting, National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081, China

Under various compressive strain rates, sea ice fails in different modes and behaves a brittle-ductile transition. To investigate the mechanism behind the transition, a fieldwork of uniaxial compression tests were performed on the level ice collected from Northeast of the Bohai Sea. The ice owns a typical h2 columnar structure, whose salinity varies from 5.5‰ to 7.4‰ while temperature ranges from -15°C to -18.3°C . In the experiments, the samples with uniform dimension of $50\text{ mm}\times 50\text{ mm}\times 107\text{ mm}$ were applied compressive load across to the grain columns. The data shows that the maximum failing stress is 4.7MPa appears at $2.8\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ while the lowest value is 1.5 MPa at $4.7\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$. During the compression tests, the samples failed in three different modes over a wide range of strain rate ($4.5\times 10^{-5} - 7.5\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$). When the failing stress is further categorized by failure mode, the stain rate-stress relation shows a consistent trend in each mode. Under low strain rate, the compressive strength has positive correlation with strain rate. The crack propagation is limited due to the stress concentration at crack tip is relaxed by creep, which leads to a ductile failure. When stain rate is between 9×10^{-4} and $5\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$, the crack was able to develop stably through the specimen along the loading direction and formed a splitting failure. The crack development became unstable and inclined cracks were preferred under high strain rate, where ice failed in a spalling mode. From ductile failure to splitting, the transition is terms of the competition between crack-tip creep and propagation. With sufficient confinement, the spalling dominates the global failure as splitting is suppressed. For both failure mode transitions, the condition is triggered by stain rate. From the measurements, it shows that each failure mode owns an according stress-strain rate relation, which is believed to explain the Brittle-ductile transition. Moreover, the influence of stain rate on the effective elastic modulus is discussed.

sea ice, uniaxial compression strength, brittle-ductile transition, failure mode

PACS: 46.50.+a, 46.35+z, 62.20.Hg, 62.20.Mk, 83.80.Nb

doi: [10.1360/SSPMA2018-00083](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00083)