

# 卤水体积和应变率影响下的渤海海冰单轴压缩强度分布

隋俊鹏<sup>1</sup>, 李宝辉<sup>1</sup>, 赵倩<sup>1</sup>, 王兆宇<sup>2</sup>, 何帅康<sup>3</sup>, 付鹏博<sup>4</sup>, 何文全<sup>4</sup>

(1. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081; 2. 辽宁省海洋预警监测中心, 辽宁 沈阳 110001; 3. 大连理工大学, 辽宁 大连 116024; 4. 营口市海洋预警监测中心, 辽宁 营口 115007)

**摘 要:** 2018—2021年3个冬季期间在渤海辽东湾鲅鱼圈海域沿岸进行海冰单轴压缩试验。采用典型的柱状结构海冰作为试验对象, 试验中加载方向垂直于柱状结构冰晶的轴向, 应变率选取区间为 $4.5 \times 10^{-5} \sim 7.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , 海冰试样的温度在 $-3 \sim -33 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间。每组试验完成后对温度、盐度和密度进行了测量, 用于计算每个试验试样的卤水体积。试验结果表明: 海冰试样的应变-应力曲线表现出3种典型形式: 韧性破坏、单峰值脆性破坏和多峰值脆性破坏。海冰名义压缩强度和卤水体积呈指数关系, 应变率影响下的海冰单轴名义压缩强度出现韧性区-过渡区-脆性区的转化过程, 在韧性区和脆性区阶段海冰的单轴名义压缩强度和应变率均呈幂函数关系。此外, 综合卤水体积和应变率的影响, 确定了海冰名义单轴压缩强度在两者共同影响下的变化规律。

**关键词:** 渤海; 海冰; 单轴压缩强度; 卤水体积; 应变率

**中图分类号:** P731.15 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2021)04-0038-07

## 1 引言

每年冬季我国渤海均受到不同程度的海冰影响, 海冰成为渤海海上运输、水产养殖及油气开采等活动的主要威胁<sup>[1]</sup>。海冰受风、浪和流等环境因素的影响可发生漂移运动<sup>[2]</sup>, 并与海冰覆盖区域内的海洋平台和风机等固定式结构发生作用, 严重时可能导致结构产生不可逆的损伤, 造成严重的经济损失<sup>[3]</sup>。挤压破坏是海冰与直立结构作用最常见的破坏模式, 其破坏过程与海冰的压缩强度密切相关, 因此研究海冰单轴压缩强度对冰区结构的确定具有重要意义<sup>[4]</sup>。

海冰的内部结构复杂且包含固态冰晶、盐水与空气组分, 因此其力学性质受多种因素影响。通常可采用试验方法对海冰单轴压缩强度进行测试。国内外学者的相关研究表明, 加载速率通常被认为是影响海冰单轴压缩强度的主要因素之一<sup>[5-7]</sup>。

Schulson<sup>[8]</sup>提出了应变率影响下的韧脆转化, 并发现压缩强度的最大值会出现在韧性和脆性之间的过渡区<sup>[8]</sup>。陈晓东等<sup>[9-11]</sup>研究了不同加载速率下渤海海冰的单轴压缩强度, 结合海冰的破坏模式解释了韧脆转化现象的机理。马玉贤等<sup>[12]</sup>在庄河海域进行了不同海冰温度下的单轴压缩试验, 分析了不同温度梯度下的应变速率-压缩强度关系。宋洪芳等<sup>[13]</sup>研究了加载方向对海冰脆性破坏时单轴压缩强度的影响, 并分析了不同加载方向海冰的主要破坏方式。海冰温度也被认为是影响单轴压缩强度的关键因素<sup>[14-15]</sup>。李志军等<sup>[16]</sup>研究了海冰孔隙率对单轴压缩强度的影响, 得到了宽应变速率范围内的单轴压缩强度统一表述。王安良等<sup>[17]</sup>综合考虑了渤海12个测点海冰的卤水体积和应力率, 研究了两者共同影响下的单轴压缩强度分布。Timco等<sup>[18]</sup>根据283次单轴压缩试验的结果, 建立了以幂函数表达的压缩强度与应变率和海冰孔隙率的数学模型。

收稿日期: 2021-04-09; 修回日期: 2021-06-01。

基金项目: 国家重点研发计划(SQ2018YFC140066, 2016YFC1401502); 国家自然科学基金(41676189)。

作者简介: 隋俊鹏(1984-), 男, 工程师, 学士, 主要从事海冰监测及预报工作。E-mail: sjp@nmefc.cn

通讯作者: 何文全(1985-), 男, 工程师, 学士, 主要从事海洋海冰灾害监测及预报工作。E-mail: 281347678@qq.com

Moslet<sup>[19]</sup>对 Svalbard 群岛附近海冰开展了连续 2 a 的现场测试,结果表明每年的气候因素对海冰生长过程的影响十分明显。因此,海冰单轴压缩强度的试验应采用多年连续测试,从而降低气候变化对海冰力学性质所产生的影响。

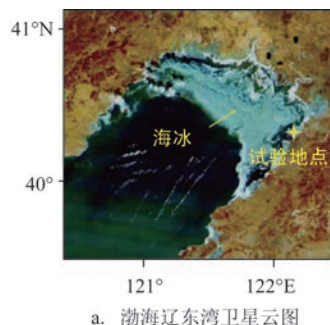
本文在 2018—2021 年的 3 个冬季,对渤海辽东湾鲅鱼圈海域沿岸的海冰单轴压缩强度进行了现场采集及室内试验测试。试验分别测试了不同温度与加载速率下海冰的单轴压缩强度变化,同时,对每个试验试样的盐度和密度进行了测量,通过试验结果研究了应变率及海冰卤水体积对海冰单轴压缩强度的影响。此外,综合考虑应变率和卤水体积,建立了单轴压缩强度的变化曲面。

## 2 渤海沿岸海冰的单轴压缩试验

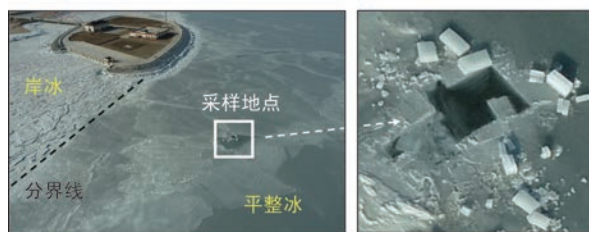
海冰与直立结构相互作用时,主要受到水平方向的力导致其发生破坏。为此,本试验主要研究水平方向,即垂直于冰晶生长方向加载情况下的海冰单轴名义压缩特性。

### 2.1 海冰试样及采集

分别在 2018 年、2019 年和 2021 年的 1 月中下旬开展了海冰物理力学性质的现场试验,海冰试样的采集与试验均完成于渤海东北部鲅鱼圈海域的极地海洋工程野外试验场。2021 年海冰采样期间渤海辽东湾海冰的卫星云图见图 1a 所示,试验地点的位置已在图中标出。图 1b 是无人机拍摄的具体的采样地点信息,图中岸冰(Landfast Ice)和平整冰(Level Ice)之间的分界线清晰可见,海冰试样采集于近岸的平整冰区域,采样点处的海冰为典型的柱



a. 渤海辽东湾卫星云图



b. 无人机拍摄的海冰采样地点信息

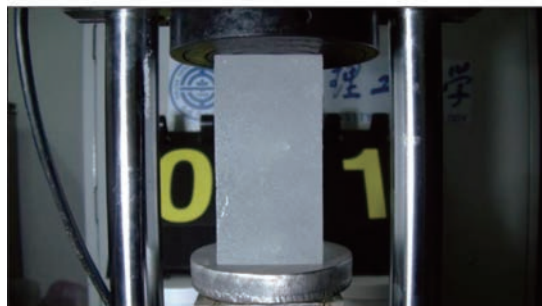
图1 海冰采样地点的信息

状结构海冰,厚度约为 25 cm。

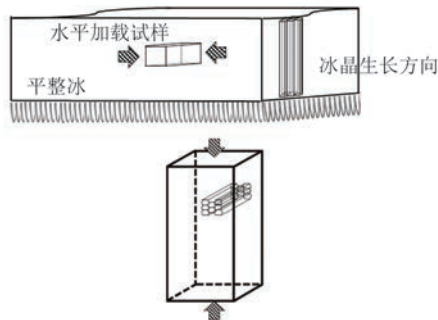
用油锯在冰面上进行切割,将切割出的方形海冰迅速运输至试验区域。方形海冰使用台锯进行加工处理,首先切除上下表面盐度较高的部分,剩余海冰沿垂直于柱状结构冰晶的轴向切割成 107 mm × 50 mm × 50 mm 大小的试样。加工后的试样放入冰柜中进行储存,同时通过控制冰柜储存温度可达到改变海冰温度的效果。

### 2.2 单轴名义压缩试验方法

海冰名义单轴压缩试验装置及示意图如图 2 所示。现场试验采用自主研发的便携式低温试验机,试验机由控制台和加载机组组成。加载机通过控制横梁的移动进行加载,加载时应力与应变的采样频



a. 单轴压缩试验图片



b. 试样加载示意图

图2 单轴压缩试验装置

率均设置为 200 Hz。试验前通过游标卡尺测量海冰试样的长、宽和高,通过电子秤测量其质量,试验后通过钻孔方式测量试样内部的实际温度。此外,取一小块试样置于密闭容器中,待其融化后用盐度计测量盐度。海冰的单轴名义压缩强度由试样破坏时的最大加载力和试样的横截面积确定,即:

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

式中,  $\sigma_c$  为海冰试样的单轴名义压缩强度;  $F_{\max}$  为试验设备施加的加载力最大值;  $A_i$  为海冰试样的横截面积。

### 3 海冰单轴名义压缩试验结果及分析

#### 3.1 海冰单轴名义压缩典型的应变-应力曲线

试验中,选取海冰试样的应变和应力用以描述海冰的受力破坏过程。不同的加载速率和海冰温度下,海冰的破坏过程和破坏模式均存在差异,典型的应变-应力曲线绘制于图 3。作用过程中应力峰值点视为发生海冰试样的破坏,应力的最大值定义为海冰的单轴名义压缩强度。本文将典型的应变-应力曲线分为 3 类: I 类曲线出现在加载速率较低或海冰温度较高时,此时试样所受应力缓慢增加,达到名义压缩强度后应力缓慢下降,加载周期较长;对应的海冰破坏模式为明显的韧性破坏,加载中试样内出现多条裂纹,但未出现破碎现象,加载后的试样整体较为“松软”,内部孔隙较大。II 类曲线应力峰值较大,达到峰值点后应力会出现快速的卸载过程;试样的破坏表现出脆性破坏的形式。海冰破坏由贯穿海冰试样的斜向裂纹主导,裂纹贯

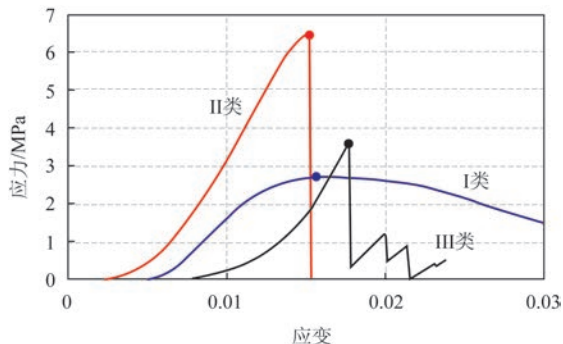


图3 单轴名义压缩试验中典型的应变-应力曲线

穿后试样发生破碎。III类曲线出现在加载速率较高或海冰温度较低时,曲线中出现多个峰值,每一次到达峰值点后均伴随应力的迅速卸载过程;加载过程中试样内部出现多条轴向裂纹,单条裂纹带来海冰试样的部分破坏,随着裂纹的增加及破坏程度的积累,海冰试样发生强烈的碎裂破坏,海冰表现出较强的脆性。

为研究气候因素对海冰物理力学性质的影响,对不同年份同一加载速率的试验数据进行分析。统计了海冰名义单轴压缩强度和海冰盐度随着时间的变化趋势(见图 4)。图中可见,不同年份的平均名义单轴压缩强度均在 4 MPa 左右,不受气候因素的影响。不同年份的海冰盐度变化幅度较大,这个变化与试验的加载速率无关,而是由自然因素产生,其导致了海冰自身物理性质(如卤水体积)的变化。

#### 3.2 卤水体积对海冰单轴名义压缩强度的影响

为研究海冰物理性质对单轴压缩试验的影响,最早使用海冰温度来构建海冰物理性质与压缩强度的关系。随着对海冰热力学研究的加深,学者们发现仅用温度不能够准确地表达出海冰物理性质的差异,因此提出用卤水体积或孔隙率作为评价海冰物理性质的指标。本文海冰采样地点较为固定,海冰空气体积差距较小,因此选用海冰试样的卤水体积作为影响因子研究其对海冰单轴名义压缩强度的影响。

卤水体积  $v_b$  曾被拟合为盐度和温度的函数,即<sup>[20]</sup>:

$$v_b = S_i \left( \frac{49.185}{|T_i|} + 0.532 \right) \quad (2)$$

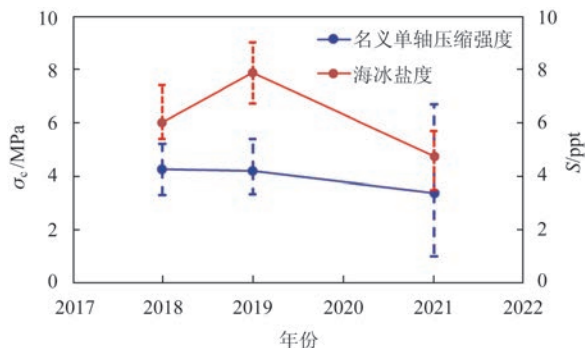


图4 海冰单轴名义压缩强度和海冰盐度随时间的变化规律



式中,  $S_i$  为海冰盐度(单位: ppt);  $T_i$  为海冰温度(单位:  $^{\circ}\text{C}$ ),  $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C} \geq T_i \geq -22.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

Cox 等<sup>[21]</sup>在拟合卤水体积表达式时考虑到海冰密度的影响, 将卤水体积  $v_b$  的计算公式表示为:

$$v_b = \rho_i S_i / F_1(T_i) \quad (3)$$

$$\rho_i(T_i) = 0.917 - 1.403 \times 10^{-4} T_i \quad (4)$$

$$F_1(T_i) = -4.732 - 22.45 T_i - 0.639 7 T_i^2 - 0.010 74 T_i^3 \quad (-2\text{ }^{\circ}\text{C} \geq T_i \geq -22.9\text{ }^{\circ}\text{C}) \quad (5)$$

$$F_1(T_i) = 9 899 + 1 309 T_i + 55.27 T_i^2 + 0.716 T_i^3 \quad (-22.9\text{ }^{\circ}\text{C} \geq T_i \geq -30\text{ }^{\circ}\text{C}) \quad (6)$$

式中,  $S_i$  为海冰盐度(单位: ppt);  $T_i$  为海冰温度(单位:  $^{\circ}\text{C}$ );  $\rho_i$  为海冰密度(单位:  $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $F_1(T_i)$  为温度的函数。

大量试验结果表明, 海冰的单轴压缩强度随着卤水体积的增加而降低, 但两者的具体关系并未有统一的表达式。本试验中控制同一加载速率  $0.2\text{ mm/s}$  进行卤水体积对单轴名义压缩强度的影响分析, 试验中卤水体积平方根  $\sqrt{v_b}$  和单轴名义压缩强度的关系见图 5。当卤水体积较低, 冰晶比例较高, 导致海冰的名义压缩强度较高, 海冰单轴名义压缩强度随着卤水体积的增加整体呈下降趋势。分别采用指数函数和幂函数进行曲线拟合, 可见幂函数在卤水体积较高时拟合值偏大, 因此本文采用指数函数来描述卤水体积平方根和海冰单轴名义压缩强度之间的关系, 得到:

$$\sigma_c = 5.999 e^{-3.431 \sqrt{v_b}} \quad (7)$$

该式的相关系数  $R^2=0.240 6$ , 可见即使在同一加载速率下, 海冰单轴名义压缩强度随卤水体积变化的离散性仍然很大, 仅用卤水体积单影响因子分析并不能得到很好的拟合效果。

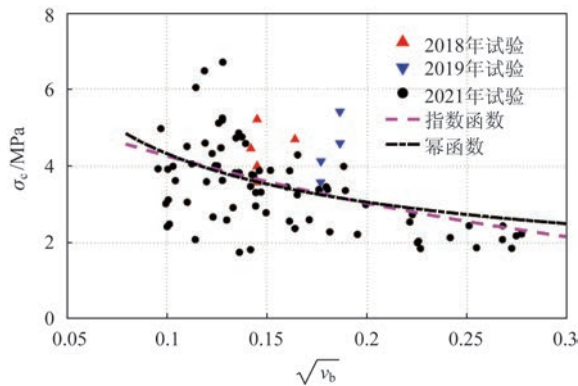


图5 海冰单轴名义压缩强度与卤水体积之间的关系

### 3.3 应变率对海冰单轴名义压缩强度的影响

结构与海冰相互作用时, 两者之间的相对速度是影响海冰破坏模式和冰载荷的重要因素, 因此在海冰的单轴压缩试验中, 通过研究应变率对海冰单轴压缩强度的影响来表征相对速度的影响。Timco 等<sup>[18]</sup>总结认为随着应变率的提高, 压缩强度随之增加。Schulson<sup>[8]</sup>的研究表明单轴压缩强度的最大值出现在海冰韧性破坏和脆性破坏间的过渡区, 而在脆性区, 压缩强度随着应变率的提高而降低。试验中, 将海冰试样的应变率  $\dot{\epsilon}$  定义为:

$$\dot{\epsilon} = \frac{v}{L_i} \quad (8)$$

式中,  $v$  为加载速率(单位:  $\text{mm/s}$ );  $L_i$  为试样的长度(单位:  $\text{mm}$ )。

在研究应变率对海冰单轴名义压缩强度的影响时, 由于海冰试样盐度和密度的不可控性, 无法严格控制卤水体积的一致性。本文在进行比较时, 分别选取了卤水体积为 20‰ 和 30‰ 左右的试样, 研究应变率影响下的单轴名义压缩强度变化规律。

图 6a 和图 6b 分别是卤水体积为 20‰ 和 30‰ 左右的海冰单轴名义压缩强度随应变率变化规律图。从均值和极值角度看, 卤水体积 20‰ 和 30‰ 左右的海冰试样的单轴名义压缩强度差距不大, 海冰单轴名义压缩强度均值在  $1.5 \sim 4.8\text{ MPa}$  之间, 极值在  $1.8 \sim 6\text{ MPa}$  之间。从图 6a 可以明显发现韧性区的海冰单轴名义压缩强度离散度较低, 强度随应变率的增大而增大; 脆性区的海冰名义压缩强度离散值较高, 强度随着应变率的增大而减小; 单轴名义压缩强度离散度最高且强度数值最大的区域出现在韧性区和脆性区之间的过渡区, 符合 Schulson<sup>[8]</sup>提出的应变率影响下的海冰韧脆转化现象。而当卤水体积提高后(见图 6b), 韧性区的海冰单轴名义压缩强度离散性有一定提高, 变化规律仍为单轴名义压缩强度随着应变率的增大而减小; 脆性区由于数据较少无法看出规律; 单轴名义压缩强度的最大值和离散度最高区域仍出现在过渡区, 但与卤水体积为 20‰ 相比, 最大值需要在更高的应变率下达到。卤水体积增加后, 韧脆转化的过渡区范围有所增加, 脆性区出现一定程度的后延, 需要在更高的应变率下才开始出现。由此可见, 应变率和名义压缩强度

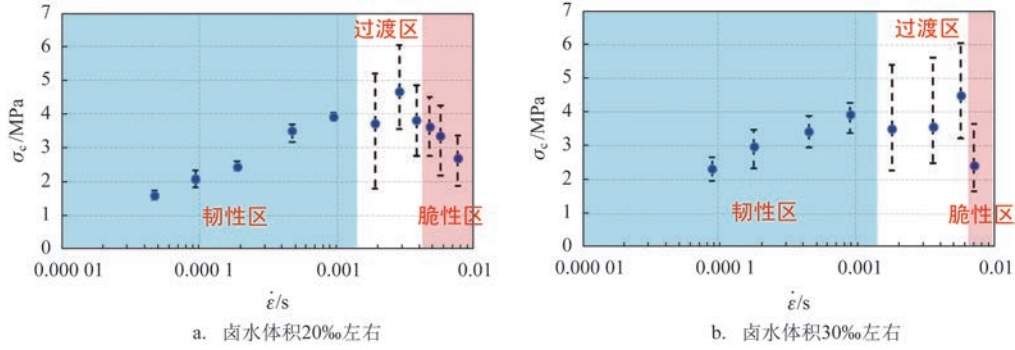


图6 海冰单轴名义压缩强度与应变率之间的关系

的相关性较强,应变率变化下的海冰存在韧脆转化现象,同时,卤水体积也会影响到应变率与单轴名义压缩强度之间的关系。

以卤水体积为20%左右的海冰试样为例,拟合应变率与海冰单轴名义压缩强度之间的变化规律。考虑到应变率影响下的海冰韧脆转化现象,采用分段函数分别拟合韧性区-过渡区名义压缩强度随应变率增大而增大的阶段和过渡区-脆性区名义压缩强度随应变率增大而减小的阶段。拟合结果显示利用幂函数进行曲线拟合的效果最佳(见图7)。两阶段的海冰单轴名义压缩强度表达式分别为:

$$\sigma_c = 14.907\dot{\epsilon}^{0.2134} \quad (9)$$

$$\sigma_c = 0.1999\dot{\epsilon}^{-0.536} \quad (10)$$

两式的相关系数( $R^2$ )分别为0.6764和0.1991,可见过渡区和脆性区单轴名义压缩强度较高的离散度给拟合带来了困难。

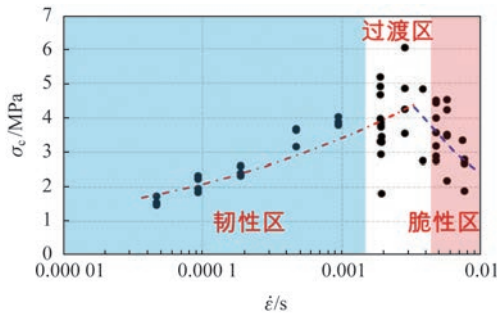


图7 应变率与海冰单轴名义压缩强度的拟合结果

### 3.4 卤水体积和应变率对海冰单轴名义压缩强度的综合影响

综合以上分析,卤水体积和应变率均能明显影响海冰的单轴名义压缩强度,仅采用单影响因素分

析是不合理的。以下对3a的试验数据进行双因素曲面拟合<sup>[22-23]</sup>。为保留应变率影响下单轴名义压缩强度在韧脆转化过渡区的变化规律,采用分段函数进行拟合,得到海冰单轴名义压缩强度与卤水体积平方根和应变率之间的关系函数:

$$\sigma_c = 4.718\dot{\epsilon}^{0.2134} (5.815e^{-3.431\sqrt{v_b}} + 0.5818) \quad (11)$$

$$\sigma_c = 1.074\dot{\epsilon}^{-0.536} (0.1854e^{-3.431\sqrt{v_b}} + 0.0428) \quad (12)$$

式(11)和式(12)分别是韧性区到过渡区阶段和过渡区到脆性区阶段的拟合函数。

将卤水体积和应变率共同影响下的海冰单轴名义压缩强度分布绘制于图8,图中可见从韧性区到过渡区阶段,海冰单轴名义压缩强度随着卤水体积的提高而减小,随着应变率的提高而增大;从过渡区到脆性区阶段,海冰单轴名义压缩强度随着卤水体积的提高而减小,随着应变率的提高而减小;最大名义压缩强度始终出现在过渡区。过渡区到

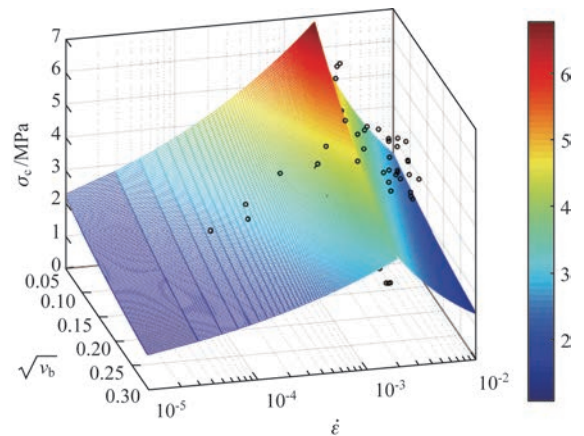


图8 卤水体积和应变率共同影响下的海冰名义单轴压缩强度分布

脆性区阶段的名义压缩强度离散性较强, 由此可以推测在此区间海冰试样破坏的随机性较高, 需要结合海冰的破坏模式或综合其他海冰物理性质分析随机性的来源。

## 4 结论

通过渤海鲰鱼圈海域2018—2021年连续3 a的海冰单轴压缩试验, 研究了卤水体积和应变速率对海冰单轴名义压缩强度的影响, 分别拟合了卤水体积、应变率、卤水体积和应变率影响下的海冰单轴名义压缩强度变化函数。结果表明, 相同的应变率下海冰单轴名义压缩强度随着卤水体积的提高而减小, 单轴名义压缩强度随卤水体积平方根的变化符合指数函数变化趋势; 近似的海冰卤水体积下, 随着应变率的变化, 海冰在单轴压缩试验中出现脆脆转化的现象, 单轴名义压缩强度随应变率的变化出现先增大后减小的趋势, 在增大和减小阶段的变化趋势均符合幂函数变化。此外, 综合了卤水体积和应变率的共同影响, 拟合了单轴名义压缩强度在卤水体积平方根和应变率两个参数下的分布规律, 为研究海冰环境参数的设计提供参考。

## 参考文献:

- [1] 刘煜, 吴辉斌. 第1讲 渤、黄海的海冰[J]. 海洋预报, 2017, 34(3): 94-101.
- [2] 李志军. 渤海海冰灾害和人类活动之间的关系[J]. 海洋预报, 2010, 27(1): 8-12.
- [3] 隋俊鹏, 李子牛, 王兆宇, 等. 2018/2019年冬季渤海海冰情分析[J]. 海洋预报, 2019, 36(3): 49-55.
- [4] 胡展铭, 陈伟斌, 唐茂宁, 等. 辽东湾东岸海冰抗压强度特征分析[J]. 海洋预报, 2009, 26(4): 11-18.
- [5] 孟广琳, 张明远, 李志军, 等. 渤海平整冰单轴抗压强度的研究[J]. 冰川冻土, 1987, 9(4): 329-338.
- [6] Timco G W, Weeks W F. A review of the engineering properties of sea ice[J]. Cold Regions Science and Technology, 2010, 60(2): 107-129.
- [7] Ji S Y, Chen X D, Wang A L. Influence of the loading direction on the uniaxial compressive strength of sea ice based on field measurements[J]. Annals of Glaciology, 2020, 61(82): 86-96.
- [8] Schulson E M. Brittle failure of ice [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2001, 68(17-18): 1839-1887.
- [9] 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[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48(12): 20-31.
- [10] 陈晓东, 崔海鑫, 王安良, 等. 基于巴西盘试验的海冰拉伸强度研究[J]. 力学学报, 2020, 52(3): 625-634.
- [11] 季顺迎, 王安良, 刘宏亮. 渤海海冰侧限压缩强度的影响因素分析[J]. 海洋通报, 2014, 33(4): 371-376.
- [12] 马玉贤, 袁帅, 史文奇, 等. 海冰温度对单轴压缩强度影响的试验研究[J]. 海洋工程, 2018, 36(3): 117-122.
- [13] 宋洪芳, 隋俊鹏, 刘煜, 等. 加载方向对海冰脆性破坏时单轴压缩强度的影响[J]. 海洋预报, 2019, 36(4): 52-59.
- [14] 李福成. 渤海海冰设计抗压强度的确定[J]. 冰川冻土, 1987, 9(S1): 97-102.
- [15] 孟广琳. 渤海平整冰抗压强度设计标准的划区分析[J]. 海洋环境科学, 1994, 13(2): 75-80.
- [16] 李志军, 张丽敏, 卢鹏, 等. 渤海海冰孔隙率对单轴压缩强度影响的实验研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2011, 41(10): 1329-1335.
- [17] 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[J]. 海洋工程, 2014, 32(4): 82-88.
- [18] Timco G W, Frederking R M W. Compressive strength of sea ice sheets[J]. Cold Regions Science and Technology, 1990, 17(3): 227-240.
- [19] Moslet P O. Field testing of uniaxial compression strength of columnar sea ice[J]. Cold Regions Science and Technology, 2007, 48(1): 1-14.
- [20] Frankenstein G, Garner R. Equations for determining the brine volume of sea ice from  $-0.5^{\circ}\text{C}$  to  $-22.9^{\circ}\text{C}$  [J]. Journal of Glaciology, 1967, 6(48): 943-944.
- [21] Cox G F N, Weeks W F. Equations for determining the gas and brine volumes in sea-ice samples[J]. Journal of Glaciology, 1983, 29(102): 306-316.
- [22] 王安良, 许宁, 毕祥军, 等. 卤水体积和应力速率影响下海冰强度的统一表征[J]. 海洋学报, 2016, 38(9): 126-133.
- [23] 王庆凯, 卢燕, 郭可彩, 等. 辽河口附近海冰单轴压缩强度的试验与统计特征[J]. 数学的实践与认识, 2014, 44(24): 157-162.

## Uniaxial compression strength distribution of sea ice in the Bohai Sea under the influences of brine volume and strain rate

SUI Jun-peng<sup>1</sup>, LI Bao-hui<sup>1</sup>, ZHAO Qian<sup>1</sup>, WANG Zhao-yu<sup>2</sup>, HE Shuai-kang<sup>3</sup>, FU Peng-bo<sup>4</sup>, HE Wen-quan<sup>4</sup>

(1. National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081 China; 2. Marine Monitoring and Early Warning Center of Liaoning Province, Shenyang 110001 China; 3. Dalian University of Technology, Dalian 116024 China; 4. Marine Monitoring and Early Warning Center of Yingkou, Yingkou 115007 China)

**Abstract:** Uniaxial compression tests are carried out along the coast of Bayuquan sea area in the Bohai Sea during the winter seasons of 2018 to 2021. Considering the structure of, a typical columnar sea ice is used as the experimental samples in view of the mesostructure characteristics of natural formed ice. In the experiment, the loading direction is perpendicular to the main axis direction of the columnar ice crystal, the range of strain rate is between  $4.5 \times 10^{-5} \sim 7.5 \times 10^{-3}/s$ , and the temperature of sea ice samples is between  $-3 \sim -33$  °C. The temperature, salinity and density are measured after each experiment to calculate the brine volume of each test sample. The results show that the strain-stress curve of sea ice samples reveals three typical forms, which are ductile failure, brittle failure with single peak and brittle failure with multiple peaks. The compression strength of sea ice has an exponential relationship with the brine volume. The uniaxial compression strength of sea ice under the influence of strain rate shows a transition process from ductile behavior to brittle behavior. The nominal uniaxial compression strength and the strain rate of sea ice in ductile and brittle modes are in a power function relationship. In addition, combining the effects of, the variation of sea ice nominal uniaxial compression strength under the under the combined influence of brine volume and strain rate is confirmed in this paper.

**Key words:** Bohai Sea; sea ice; uniaxial compression strength; brine volume; strain rate