渤海海冰孔隙率对单轴压缩强度影响的实验研究

李志军^{①*}, 张丽敏^①, 卢鹏^①, Matti LEPPÄRANTA^②, 李广伟^①

① 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 大连 116024;

② Department of Physics, Helsinki University, Helsinki FI-00014, Finland

* E-mail: lizhijun@dlut.edu.cn

收稿日期: 2010-12-15; 接受日期: 2011-05-19

国家自然科学基金(批准号: 50921001, 50879008)、冻土工程国家重点实验室开放基金(批准号: SKLFSE200904)和芬兰自然与文化科学院 Vilho, Yrjö 和 Kalle Väisälä 基金资助项目

摘要 针对 2009~2010 年冬季渤海出现的异常冰情, 在辽东湾东岸某港区外潮沟采集海冰, 加工成冰样; 在控温精度 0.1℃ 的条件下, 对 117 个柱状冰冰样沿平行冰面方向加载, 测试冰样的单轴压缩强度、密度、盐度. 试验温度分别是 -4℃, -7℃, -10℃, -13℃ 和 -16℃, 加载应变速率率在 10^{-6} ~ 10^{-2} s⁻¹, 覆盖了冰的韧性破坏、韧脆过渡和脆性破坏区域. 试验结果支持宽应变率范围内单轴压缩强度随孔隙率的变化曲面. 由此得到冰力学行为转折点随孔隙率变化的定量表达; 实现了描述单轴压缩强度在不同破坏行为下的统一数学表达式; 此外, 还推断出 2009~2010 年渤海异常冰情不会导致渤海海冰单轴压缩强度设计值的调整.

关键词

海冰
冰问题
冰管理
压缩强度

在风、浪、潮、流等环境因素的作用下, 渤海浮冰在海上漂移, 当浮冰遇到结构物或者船舶时会对它们施以作用力. 历史上, 渤海和黄海北部的海冰曾对海岸和近海工程结构物、船舶航行和渔业生产等构成严重威胁^[1]. 近年来, 极端气象现象发生的频率在增加. 2009~2010 年冬季渤海出现了 30 年来同期异常冰情, 其结冰面积已达到整个渤海的 51%, 使得海上的交通运输、油气开采受到影响、渔业生产蒙受损失, 特别是山东、辽宁两省的养殖业损失合计超过 40 亿元^[2]. 2009~2010 年渤海出现的冰情, 警示人们在可能全球气候变暖的条件下, 仍然关心异常冰情潜在的灾害. 它不仅仅是气温负积温的结果, 还蕴藏着日平均气温变化幅度和频率的影响. 因此国内学者正致力于研究北冰洋海冰同渤海海冰, 以及北太平洋海温异常同渤海海冰变化^[3], 甚至同黑龙江上游冰坝变化之间的关系^[4].

浮冰的动能决定冰是以撞击或是以挤压方式给予结构物作用力. 当浮冰以撞击方式作用于结构物时, 浮冰面积、速度和厚度是关键冰设计参数; 当浮冰以破碎方式给予结构物作用力时冰的速度决定冰在结构物前的韧性, 脆性破坏方式, 因此浮冰速度、厚度、强度是关键冰设计参数. 根据已有渤海海冰成果^[5], 渤海浮冰运动速度较大, 浮冰多数在结构物前表现为自身破碎. 因此到目前为止, 渤海海上结构设计以极限冰荷载为依据, 只有辽东湾东岸长兴岛一处海岸结构物设计考虑浮冰冲击力^[6].

当浮冰以自身破碎方式给结构物施加荷载时, 海冰在结构物前的破坏形态视冰内缺陷、晶体结构、受力方向等而具有一定的随机性, 传递到结构物上的作用力也属随机荷载^[7]. 但作为冰区结构物设计, 只取冰作用力的上限值. 因此, 需要不同重现期的冰厚度和冰强度的上限值作为设计指标. 2009~2010 年

冬季渤海冰情出现异常,它能否导致冰工程设计参数调整?一般而言,设计冰厚度是历史资料的概率,引入异常冰情参数后会引引起设计厚度改变;而冰强度不与历史资料相关,主要取决于冰物理性质参数是否改变。

极限单轴压缩强度是一个典型的冰设计强度指标,以往对渤海海冰的单轴压缩强度也做了大量试验研究^[8-11],发现冰内部结构、温度和加载方向、加载速度(加载位移速率)等因素差异造成不同年度、不同地点的冰单轴压缩强度既符合一定规律,又有一定程度的差异。其中为了表达海冰物理性质对力学性质的控制作用,首先利用温度建立了二者之间的关系^[5, 9],这虽然体现了冰是温度敏感材料,但冰内盐度和气泡效应没有体现出来;对于高纬度低温海冰,冰内气泡较少,盐度调节海冰特征,因此卤水体积(冰温度、盐度)曾经一度作为评价冰力学、热学、电学等性质的物理指标^[12],并延续到本世纪^[13]。渤海海冰温度较高,冰内气泡含量较大,使用卤水体积,限制了对春季高温冰力学性质的正确评价,因此需要不断探索冰力学和热学性质与孔隙率之间的定量关系^[14, 15]。当然我们承认渤海海冰含有有机污染物,导致海冰的颜色同极地海冰不同,但是海冰的力学性质主要受海冰物理性质控制,即孔隙率是主因,但不排除冰内杂质的影响。目前对冰内杂质的影响程度无法定量评估,如果其影响程度小于试验误差,就不必考虑。因此靠目前的冰力学试验水平和对化学物的认知程度来回答该问题还不成熟。需要类似解决冰内硝基苯污染那样,在环境和化学实验室手段下解决^[16]。海冰单轴压缩强度的孔隙率效应首先由 Fransson 和 Stehn 定量探索^[17],他们的成功经验为评价渤海海冰单轴压缩强度提供启示。但是围绕渤海海冰的工程应用,过去的工作只是建立了峰值单

轴压缩强度、峰值弯曲强度、峰值剪切强度和弹性模量同孔隙率之间的试验关系^[11],对宽应变速率范围内冰单轴压缩强度同孔隙率的关系没有定量描述。Moslet^[18]曾指出此问题并试图发展宽应变速率范围内单轴压缩强度同孔隙率的关系。

本文针对 2009~2010 年冬季渤海异常冰情,取样进行系统的冰单轴压缩强度试验,建立了宽应变速率范围的单轴压缩强度同孔隙率的试验关系;并且推断出 2009~2010 冬季渤海异常冰情并不会导致渤海冰单轴压缩强度设计值的改变。

1 试样及其内部结构

试样于 2010 年 1 月 17 日取自渤海辽东湾东南沿岸某港区的深水潮沟,高潮时水深 3.0 m,低潮 1.8 m,海冰表面平整光滑。采得单层冰厚 31.2 cm,从冰坯侧面看出因冰内气泡含量多寡分层造成冰内类似多层结构,每层厚度约 5 cm,但不存在明确的不连续层面;冰较密实,冰内含泥较少。

海冰晶体结构决定海冰力学性质是否属于各向异性行为。因此,将冰样在 -18°C 的低温环境实验室沿冰坯垂直方向切片,削切到 $0.5\sim 0.2\text{ mm}$ 后,放置在费氏台上,在正交偏光镜下观测冰内部结构,发现冰片内无明显晶体不连续现象,属于连续生长的单层冰,并非堆积冰或者重叠冰晶体,均为柱状冰,符合渤海海冰的一般特点。现场取样时冰坯的温度、盐度和晶体指标见图 1。

2 试验方法和结果

海冰单轴压缩强度试样是使用电动链锯从冰中割取冰坯,并在现场使用细木工带锯将冰坯按上下

图 1 海冰取样冰坯现场温度、盐度和晶体指标参数垂直剖面

二层切割取样, 在 -15°C 下贮存. 然后运至实验室内进一步加工成 $7\text{ cm}\times 7\text{ cm}\times 17.5\text{ cm}$ 的长方体试样.

在工程实践中, 主要采用平行于冰面方向的强度值作为设计依据. 本次加工的试样均为平行水平面加载形式. 试样位于冰坯内 $5\sim 15\text{ cm}$ 和 $17\sim 27\text{ cm}$ 深度处, 均为晶体基本一致的柱状冰.

试验用 CSS-44100 型电子万能试验机配以低温恒温试验箱进行加载, 由 EDC120 数字控制器控制位移速率并采集数据. 低温恒温箱连接 BF-200 型循环冷浴并接入了温度精度 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 的日本 SHIMADEN 公司生产的 SR253 型温控表, 其温度分辨率为 0.01°C . 试验前, 将试样置入其中并恒温 12 h 以上, 保证试样达到热平衡.

试样孔隙率是一项很难测试的参数, 需要测试冰样的温度、密度、盐度; 用 Cox 和 Weeks 方法计算^[19]. 每个冰样试验前用分辨率为 0.1 mm 的卡尺测量各边 3 个不同位置的长度, 计算平均体积; 然后用感量 0.1 g 的电子天平称重. 每个试样试验后使用精度为 ± 0.005 的 SYA2-2 型实验室盐度计测量冰样融水的盐度.

依据渤海辽东湾以往测得和现场测得的海冰温度范围^[20], 设计了 -4 、 -7 、 -10 、 -13 和 -16°C 温度下的海冰单轴压缩强度试验, 获得 117 个试样的有效数据. 由于冰内晶体不存在大变化, 因此在试验数据统计分析时, 不做分层处理.

每一加载试样能够获得一条应力-应变过程线. 相同试验温度不同应变速率下得到的应力-应变曲线不同, 这是冰特有的力学行为. 图 2 以 -10°C 的试验为例, 给出不同破坏形式对应的应力-应变特征曲线. 曲线 A 反映冰的脆性破坏特征; B 韧脆过渡破坏特征; C 韧性破坏特征; D 蠕变破坏特征, 其峰值在不出现拐点时取应变 0.20 时对应的应力.

将图 2 每条曲线上发生拐点的极限应力定义为冰单轴压缩强度, 结果发现不同温度 and 不同位移速率试验条件下获得的单轴压缩强度不同. 采用应变速率代替位移速率后, 得到同一温度下单轴压缩强度同应变速率之间的关系, 见图 3. 图 3 体现的是冰单轴压缩强度特征, 这一特征与渤海和其它地区的海冰具有相似性, 均表现出在低应变速率区内的韧性破坏特点 (I - 韧性区); 高应变速率区内的脆性破坏特点 (III - 脆性区) 和两者之间的韧脆过渡破坏特点 (II - 韧脆过渡区).

图 2 冰样在不同应变速率下表现的不同破坏形式所对应的应力-应变特征曲线(-10°C)

图 3 冰样(-10°C)单轴压缩强度与应变速率的关系
I, 韧性区; II, 韧脆过渡区; III, 脆性区

汇总 117 个冰样应力-应变曲线的单轴压缩强度, 发现不同试验温度下峰值单轴压缩强度及其对应的应变速率值以及脆性破坏的单轴压缩强度及其对应的应变速率均不同. 表 1 总结归纳出这些关键试验参数.

3 结果讨论与分析

3.1 峰值单轴压缩强度同冰物理指标的关系

用非线性关系拟合表 1 的数据, 得到出现峰值单轴压缩强度($\sigma_{c,\max}$)同温度(θ)之间的试验关系式(见图 4):

$$\sigma_{c,\max} = 1.344 \ln|\theta| - 0.36. \quad (1)$$

(1)式以往作为渤海海冰设计单轴压缩强度的依据, 但它忽略了应变速率和盐度、气泡对压缩强度的影响, 特别是以往采用线性统计形式^[21], 不符合解释当海冰温度接近冰点时, 强度接近零的物理事实^[14]. 如果采用(1)式的对数函数形式, 因为海冰的冰温度不会等于 0 , 而是根据冰内温度处在某个负温

表 1 试验冰温度对应的峰值、脆性压缩强度及其对应应变速率

Index	Series 1	Series 2	Series 3	Series 4	Series 5
Temperature (°C)	-16	-13	-10	-7	-4
Average porosity (%)	16.93	19.26	25.43	32.06	46.58
Peak uniaxial compressive strength (MPa)	3.58	3.00	2.70	2.00	1.69
Strain rate corresponding to the peak uniaxial compressive strength ($\times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$)	3.7	3.7	3.7	3.6	3.4
Brittle uniaxial compressive strength (MPa)	1.80	1.60	1.20	0.90	0.60
Strain rate corresponding to the brittle uniaxial compressive strength ($\times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$)	18.0	20.0	25.0	32.0	45.0

图 4 峰值单轴压缩强度与温度的关系

区间, (1)式可以保证强度值在冰点附近接近零. 它不仅符合数学上的要求, 同时符合物理上的要求. 由于以往建立的压缩强度-应变速率关系只适合韧性区, 这导致一些设计者没有关注韧性区范围, 而使用韧性区关系式计算韧性应变速率范围外的强度, 使得冰压缩强度特点混淆成一般非晶体固体材料. 如果采用宽应变速率范围内的单轴压缩强度同应变速率的定量描述, 确定峰值单轴压缩强度出现的应变速率是必要的. 为了配合孔隙率作为冰物理综合评价指标, 孔隙率同出现峰值单轴压缩强度对应的应变速率($\dot{\epsilon}_{c,\max}$)和脆性单轴压缩强度对应的应变速率

($\dot{\epsilon}_{c,b}$)也需要定量统计, 作为区分特征变化位置的界限指标, 使用表 1 的数据得到试验统计关系(图 5(a), 5(b))和下式:

$$\dot{\epsilon}_{c,\max} = -0.2931 \ln(v_T) + 4.576, \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon}_{c,b} = 26.603 \ln(v_T) - 58.894. \quad (3)$$

冰样内孔隙率为卤水胞和空气泡体积比之和. Cox 和 Weeks 根据冰的相图, 进行拟合, 发展了根据冰层或者冰样的温度、盐度和密度, 计算其对应孔隙率的拟合公式, 见下式^[19]:

$$v_T = v_b + v_a, \quad (4)$$

$$v_b = \frac{\rho S_i}{F_1(\theta)}, \quad (5)$$

$$v_a = 1 - \frac{\rho}{\rho_i} + (\rho S_i) \frac{F_2(\theta)}{F_1(\theta)}, \quad (6)$$

$$F_1(\theta) = \alpha_0 + \alpha_1 \theta + \alpha_2 \theta^2 + \alpha_3 \theta^3, \quad (7)$$

$$F_2(\theta) = \beta_0 + \beta_1 \theta + \beta_2 \theta^2 + \beta_3 \theta^3, \quad (8)$$

$$\rho_i = 0.917 - 1.403 \times 10^{-4} \theta, \quad (9)$$

式中, v_T 为总孔隙率(%); v_b 为卤水体积比(%); v_a 为空气体积比(%); ρ_i 为纯冰密度(kg m^{-3}); S_i 为冰样盐度; θ 为冰样温度(°C); ρ 为冰样密度(kg m^{-3}); $F_1(\theta)$ 和

图 5 峰值单轴压缩强度和脆性单轴压缩强度对应应变速率与孔隙率的关系
(a) 峰值单轴压缩强度对应的应变速率; (b) 脆性单轴压缩强度对应的应变速率

$F_2(\theta)$ 函数的统计系数由表 2 和 3 给出.

3.2 单轴压缩强度同应变速率的统计关系

图 3 所示的单轴压缩强度同应变速率关系是选择冰设计单轴压缩强度和解释冰对结构物作用力的依据. 正是因为冰强度同应变速率的关系, 在冰管理中, 海上结构物的安全运行所承受的冰作用力是实时冰情的结果, 对应实时冰厚度、强度、冰温度和冰运动速度条件下的作用力, 这就需要宽应变速率范围内的冰强度. 但针对实践中无法实时测试冰应变速率的事实, 引入了一个能够实时监测的冰参数, 即冰运动速度. 对于直立圆柱结构物, 冰应变速率同结构物宽度和冰运动速度有关, 即 $\dot{\epsilon} = V / (2D)$, V 为浮冰运动速度; D 为结构物宽度^[22]. 对于抗冰结构设计, 需要冰强度的上限, 直接选择图 4 的峰值强度. 该强度只与冰的孔隙率和加载方向有关, 与应变速率无关. 这是评价渤海海冰孔隙率同设计强度的根本出发点^[11, 14].

已有学者对图 3 所示的冰压缩强度-应变速率特征曲线从力学行为关系^[23-25]或者试验统计关系上进行数学描述^[21]. 在韧性破坏区, 单轴压缩强度同应变速率符合下式:

$$\sigma_{cd} = A\dot{\epsilon}^B. \tag{10}$$

该特征关系被海冰界普遍采用, 并且同力学行为关系分析一致^[18, 23, 26]. 但宽应变速率范围单轴压缩强度特征关系还没有明确的最佳表达形式, 一般采用分段函数进行拟合. 针对渤海海冰的单轴压缩强度试验研究结果, 孟广琳等人^[21]采用 4 分段函数拟合试验数据. 这些结果只是针对某一温度的单轴压缩强度-应变速率关系, 函数形式如下:

表 2 $F_1(\theta)$ 函数统计系数和相关系数

$\theta(^{\circ}\text{C})$	α_0	α_1	α_2	α_3	r
$-2 > \theta \geq -22.9$	-4.372	-22.45	-0.6397	-0.01074	0.9999
$-22.9 > \theta \geq -30$	9899	1309	55.27	0.716	0.9999

表 3 $F_2(\theta)$ 函数统计系数和相关系数

$\theta(^{\circ}\text{C})$	β_0	β_1	β_2	β_3	r
$-2 > \theta \geq -22.9$	0.08903	-0.01763	-0.000533	-0.0000088	0.9999
$-22.9 > \theta \geq -30$	8.547	1.089	0.04518	0.0005819	0.9999

$$\sigma_c = \begin{cases} A\dot{\epsilon}^B, & (\dot{\epsilon} < 1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}), \\ C \sum_{i=0}^4 A_i (\lg \dot{\epsilon})^i, & (1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1} \leq \dot{\epsilon} \leq 2.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}), \\ A\dot{\epsilon}^B, & (2.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1} < \dot{\epsilon} \leq 4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}), \\ A, & (\dot{\epsilon} > 4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}). \end{cases} \tag{11}$$

张效忠等人^[27]在总结渤海海冰应力-应变关系的基础上, 对试验结果进行三段函数模拟, 其忽略孟广琳等人^[21]中的第二部分, 得到与沈梧等人^[8]相似的结果. 张效忠等人^[27]的突出贡献是引入一个与温度、盐度和密度有关的因子, 即,

$$\sigma_c = A\dot{\epsilon}^B(1 - \sqrt{C}), \tag{12}$$

式中, A 为与应变速率相关的参数; C 为与温度、盐度、密度相关的参数; B 为一个综合参数. A, B, C 都由试验数据确定. 张效忠等人^[27]根据渤海的一般情况, 假设冰温度 = -5°C , 冰盐度 = 3‰ , 冰密度 = 917 kg m^{-3} , 给出了对应的 A, B, C 系数, 见表 4.

Timco 和 Weeks^[13]总结了海冰工程性质, 包含了一年冰和多年冰的单轴压缩强度. 其中回顾了 Timco 和 Frederking 发展的海冰层内强度计算模式和计算不同晶体类型一年冰的单轴压缩强度表达式^[28]:

$$\sigma_{cd} = A\dot{\epsilon}^B(1 - \sqrt{v_T/C}), \tag{13}$$

式中 $B=0.22$, 孔隙率单位 ‰ . 关系式适合的应变速率范围是 $10^{-7} \sim 2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, 对应韧性破坏区.

Kovacs 建议将冰单轴压缩强度表达为^[29]

$$\sigma_{cd} = A\dot{\epsilon}^B v_T^C, \tag{14}$$

式中, $A=2.7 \times 10^3$, $B=1/3$, $C=-1$, 应变速率范围 $10^{-6} \sim 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, 孔隙率单位 ‰ , 单轴压缩强度单位 MPa.

Timco 和 Weeks^[13]的总结表明国际上还是缺少宽应变速率的冰单轴压缩强度的数学描述并且韧性区描述的公式也各有优缺点. Timco 和 Frederking^[28]保证了孔隙率为零时属于纯冰的试验值, 但根据 Li 等人^[11]应用到评价渤海冰层强度的经验, 系数 B, C 很难保证所有地区海冰均相同. Kovacs^[29]形式灵

表 4 A, B, C 系数的取值

Mechanical behavior and strain rate range (s^{-1})	A	B	C
Viscoplasticity ($\dot{\epsilon} \leq 1.75 \times 10^{-3}$)	88.925	0.350	0.531
Visco-elastic-plasticity ($1.75 \times 10^{-3} < \dot{\epsilon} \leq 4 \times 10^{-3}$)	1.499	-1.175	0.998
Viscoelasticity ($\dot{\epsilon} > 4 \times 10^{-3}$)	1.000	0	0

活, 但固定的参数除难以保证所有地区海冰的系数 A, B, C 一致外, 还不能保证孔隙率为零时的纯冰理想属性. 虽然在事实上海冰孔隙率不会为零, 但在数学表达上不完善.

总结上述工作, 引入孔隙率概念, 形成一个具有真实物理意义并且具有宽应变速率范围的表达式. 经过对 2010 年试验数据进行拟合, 发现图 6 所得曲面比较理想. 该曲面实现了宽应变速率范围内单轴压缩强度随孔隙率变化的定量描述, 与张效忠等人^[27]的三段函数思想一致, 但赋予完整的物理意义, 见下式:

$$\sigma_c = A\dot{\epsilon}^B(1+\nu)^C. \quad (15)$$

其三种破坏形式下的 A, B, C 及相关系数在同试验压缩强度精度的敏感性分析比较后, 决定取 4 位有效数据, 汇总于表 5.

3.3 渤海单轴压缩强度设计取值讨论

以往将渤海海冰峰值单轴压缩强度作为抗冰结构物设计参数, 最先考虑的影响因子是温度, 后来发展到卤水体积(温盐二因子), 现在积极推动使用孔隙率(温盐密三因子). 但为了比较历史资料, 采用温度单因子来同化.

孟广琳^[9]总结了渤海平整冰的单轴压缩强度设

表 5 A, B, C 系数的取值

Mechanical behavior/ failure form	A	B	C	r
Viscoplasticity/ ductile failure	112.8440	0.2418	-0.7530	0.934
Visco-elastic-plasticity/ transition failure	3.9000	-0.3692	-0.7959	0.894
Viscoelasticity/brittle failure	48.8160	0	-1.1383	0.999

图 6 渤海海冰宽应变速率范围单轴压缩强度随孔隙率的变化曲面

计标准. 该标准将 1985~1989 年间渤海不同地区的海冰单轴压缩强度试验结果进行总结, 建议采用一个能代表各种海冰均值的经验公式:

$$\sigma_{c, \max} = 1.77 - 0.13\theta_i. \quad (16)$$

张明元等人^[30]对黄海北部海冰单轴压缩强度进行了类似总结, 此后张明元等人^[10]又对辽东湾北部海冰平行冰面加载的单轴压缩强度试验进行总结. 同样用线性拟合峰值单轴压缩强度并给出数据(见表 6).

结合 2009~2010 年冬季的试验结果, 将文献[9, 10, 14, 30]的数据汇总到图 7. 对比发现, 2009~2010 年冬季渤海海冰峰值单轴压缩强度同历史研究结果在同一范围. 因此断定 2009~2010 冬季渤海海冰异常, 并没有使单轴压缩强度出现本质差异. 而海冰厚度和分布范围上出现的特殊情况, 要求未来深入研究 2009~2010 冬季渤海海冰异常对设计厚度的影响, 特别是对莱州湾、渤海湾海冰设计厚度的影响.

4 结论

1) 图 4 和 5 证明峰值单轴压缩强度、脆性单轴压缩强度及其对应的应变速率同温度和孔隙率间具有良好关系, 这些关系被作为区分冰压缩特征变化位置的界限指标和冰设计单轴压缩强度的依据. 试验数据给出的统计结果既保证强度值在冰点附近接

表 6 平行冰面加载的峰值单轴压缩强度/温度试验结果

Source	MPa °C ⁻¹	MPa °C ⁻¹	MPa °C ⁻¹	MPa °C ⁻¹	MPa °C ⁻¹
Ref. [30]	2.10/-1.0	3.19/-4.5	3.46/-10.0	4.09/-15.5	
Ref. [10]	1.99/-5	2.26/-10	3.03/-15	3.38/-20	4.18/-25

图 7 渤海峰值单轴压缩强度与温度之间的实验关系曲线

近零的物理事实, 又保证宽应变速率范围单轴压缩强度的统一描述; 避免将冰压缩强度特点混淆成一般非晶体固体材料压缩强度对孔隙率敏感, 对应变速率不敏感的特征.

2) 海冰工程管理需要宽应变速率范围内渤海海冰单轴压缩强度特征的数学表达. 试验得到该特征随孔隙率的变化能够统一到一个表达式, 即 $\sigma_c = A\dot{\epsilon}^B(1+\nu)^C$. 用三分段函数的不同系数值体现海冰破坏的韧性、韧-脆过渡和脆性行为, 实现了宽应变速率范围内单轴压缩强度随孔隙率变化的定量描述,

与其他学者的三段函数思想一致, 但赋予完整的物理意义, 又保证了表达式在孔隙率为零时属于纯冰属性的理念.

3) 依据试验结果, 可以判断出渤海海冰单轴压缩强度设计值不会因 2009~2010 年渤海异常冰情发生调整, 但应该关注 2009~2010 年冬季渤海海冰异常对设计厚度的影响, 特别是对莱州湾、渤海湾海冰设计厚度的影响. 在研究渤海海冰设计厚度时不仅重视来自气温负积温的影响, 更应该重视气温变化频率和幅度导致的冰情异常.

参考文献

- 1 史庆增, 苏彪, 刘波. 海冰对海上油气工程的破坏及减灾措施. 石油工程建设, 2005, 31(4): 19-23
- 2 张潇. 以海冰灾害为例探讨山东海洋渔业保险现状及对策. 齐鲁渔业, 2010, 27(6): 49-50
- 3 张恒德, 高守亭, 刘毅. 极涡研究进展. 高原气象, 2008, 27(2): 452-461
- 4 郭增红, 于成刚. 北太平洋海温异常对黑龙江上游冰坝的影响及其预报的研究. 黑龙江水专学报, 2010, 37(3): 125-128
- 5 李福成. 渤海海冰设计抗压强度的确定. 冰川冻土, 1987, 9(S1): 97-102
- 6 李志军, 贾青, 王国玉, 等. 流冰对码头排桩撞击力的物理模拟试验研究. 工程力学, 2010, 27(3): 169-173, 197
- 7 Sodhi D S, Takeuchi T, Nakazawa N, et al. Medium-scale indentation tests on sea ice at various speeds. Cold Reg Sci Technol, 1998, 28: 161-182
- 8 沈梧, 林树枝. 渤海一年冰单轴压缩强度的应变速率敏感性. 大连工学院学报, 1984, 23(4): 45-50
- 9 孟广琳. 渤海平整冰抗压强度设计标准的划区分析. 海洋环境科学, 1994, (2): 75-80
- 10 张明元, 杨国金. 辽东湾北岸海冰物理力学性质. 中国海上油气(工程), 1999, 11(4): 14-20
- 11 Li Z J, Lu P, Devinder S S. Zones of Bohai for ice engineering projects based on physical and mechanical parameters of ice. In: Proceedings of 18th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. Potsdam, 2005, 2: 873-882
- 12 Frankenstein G, Garner R. Equations for determining the brine volume of sea ice from -0.5°C to -22.9°C . J Glaciol, 1967, 6(48): 943-944
- 13 Timco G W, Weeks W F. A review of the engineering properties of sea ice. Cold Reg Sci Technol, 2010, 60: 107-129
- 14 Li Z J, Wu Z W. On the application of ice porosity in the analysis of ice compressive strength. In: Proceedings of the 13th International Symposium on Ice, Beijing, 1996. 80-85
- 15 Shi L Q, Bai Y L, Li Z J, et al. Preliminary results on the relationship between thermal diffusivity and porosity of sea ice in the Antarctic. Chin J Polar Sci, 2009, 20(1): 72-80
- 16 李志军, 王昕, 李青山, 等. 不同条件下硝基苯在水-冰体系中的分配研究. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2008, 38(7): 1131-1138
- 17 Fransson L, Stehn L. Porosity effect on measured strength of warm ice. In: Proceedings of 12th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, Hamburg, 1993. 23-26
- 18 Moslet P O. Field testing of uniaxial compression strength of columnar sea ice. Cold Reg Sci Technol, 2007, 48: 1-14
- 19 Cox G F N, Weeks W F. Equations for determining the gas and brine volumes in sea-ice samples. J Glaciol, 1983, 29(102): 306-316
- 20 Li Z J, Sui J X, Yan D C, et al. Temperature, salinity, and density profiles in a fast ice sheet in Liao Dong Bay. In: Proceedings the 10th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, Luleå, 1989. 218-224
- 21 孟广琳, 李志军, 李福成, 等. 渤海北部平整冰抗压强度设计标准研究. 海洋工程, 1989, 7(3): 65-73
- 22 Michel B, Toussaint N. Mechanisms and theory of indentation of ice plates. J Glaciol, 1977, 19(81): 285-300
- 23 Sinha N K. Constant strain- and stress-rate compressive strength of columnar-grained ice. J Mater Sci, 1982, 17: 785-802
- 24 Wu M S, Niu J. Micromechanical prediction of the compressive failure of ice: Model development. Mech Mater, 1995, 20: 9-32
- 25 岳前进, 任晓辉, 陈巨斌. 海冰韧脆转变实验与机理研究. 应用基础与工程科学学报, 2005, 13(1): 36-41
- 26 李洪升, 岳前进, 沈梧. 海冰的黏性效应及模型理论. 大连理工大学学报, 1993, 33(2): 145-149
- 27 张效忠, 白若阳, 江爱民. 海冰的本构关系及其抗压强度研究. 力学与实践, 2009, 31(6): 50-52, 45
- 28 Timco G W, Frederking R M W. Compressive strength of sea ice sheets. Cold Reg Sci Technol, 1990, 17: 227-240
- 29 Kovacs A. Estimating the full-scale flexural and compressive strength of first-year sea ice. J Geophys Res, 1997, 102(C4): 8681-8689
- 30 张明元, 孟广琳, 隋吉学, 等. 黄海北部庄河附近海域海冰物理力学特性. 海洋通报, 1995, 14(4): 11-17