

重叠冰单轴压缩强度特性的试验研究

李伟¹, 徐滢², 申辰¹, 李育凝¹,
吴宽宽², 王国军², 张大勇²

(1.中海油研究总院有限责任公司, 北京 100010; 2.大连理工大学 化工海洋与生命学院, 辽宁 盘锦 124221)

摘要:重叠冰作为海冰的一种生长形式, 对冰区作业的海洋工程装备具有不可忽视的重要影响。本文通过实验室制备重叠冰, 深入研究了重叠冰在单轴压缩作用下的破坏模式和强度特性, 并且与同等条件下的单层冰进行了对比。研究表明, 在应变速率为 $10^{-4} \sim 10^{-2}$ /s 时, 重叠冰的破坏主要发生在冻结层, 劈裂裂纹沿冻结层扩展; 而单层冰则展现出韧性破坏、劈裂和碎裂 3 种模式, 其劈裂裂纹发生在试样的不同位置。重叠冰和单层冰的压缩强度均随应变速率先增加后减小, 在应变速率为 10^{-3} /s 附近达到最大。试验结果表明, 重叠冰的单轴压缩强度通常低于同条件下形成的单层冰, 其强度为单层冰的 69% ~ 83%。本研究为理解重叠冰的力学性质和抗冰结构设计条件提供了重要的理论参考。

关键词:重叠冰; 单轴压缩强度; 破坏模式; 应变速率; 室内测试

中图分类号:P731.15 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-6336(2025)04-0524-10

Study on the compressive strength of rafted ice based on experiments testing

LI Wei¹, XU Ying², SHEN Chen¹, LI Yuning¹,
WU Kuankuan², WANG Guojun², ZHANG Dayong²

(1.CNOOC Research Institute Ltd., Beijing 100010, China; 2.School of Chemical Engineering, Ocean and Life Sciences, Dalian University of Technology, Panjin 124221, China)

Abstract: The rafted ice, as a form of sea ice, has a significant impact on the equipment used in ice-covered areas. Based on indoor testing, this study thoroughly investigates the failure modes and strength characteristics of rafted ice under uniaxial compression and compares them with single-layer ice. The research shows that when the strain loading rate is 10^{-4} /s to 10^{-2} /s, the damage of the overlapping ice mainly occurs in the frozen layer, and the crack extends along the frozen layer. While single-layer ice exhibits three modes of ductile failure, splitting, and fragmentation, with splitting cracks occurring at different locations within the specimen. The compressive strength of both overlapping ice and single-layer ice increases first and then decreases with the strain rate, reaching its maximum near a strain rate of 10^{-3} /s. The experimental results indicate that the uniaxial compressive strength of rafted ice is generally lower than that of single-layer ice under the same conditions, with its strength being 0.69 to 0.83 times that of single-layer ice. This study provides important theoretical references for understanding the mechanical behavior of rafted ice and for designing ice-resistant structures.

收稿日期: 2024-11-07, 修订日期: 2025-01-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(52071055); 中国海洋石油有限公司科技课题: “海冰环境及固定平台结构抗冰关键技术研究(KJZH-2023-2402)”

作者简介: 李伟(1981-), 男, 河北张家口人, 博士, 高级工程师, 主要从事海洋油气和海上新能源等方面研究, E-mail: liwei172@cnooc.com.cn

通信作者: 张大勇(1978-), 男, 辽宁庄河人, 教授, 博士生导师, 主要从事抗冰结构设计、安全评估方面研究, E-mail: zhangdy@dlut.edu.cn

Key words: rafted ice; uniaxial compressive strength; failure modes; strain rate; experiments testing.

冰载荷是寒区海洋工程结构抗冰设计的主要控制荷载,我国渤海寒区海工结构设计中考虑单层冰和重叠冰的影响。重叠冰是平整海冰在风、浪、流等外力作用下运动或断裂,在冰间形成水道或临近冰之间发生重叠和堆积而产生的,重叠冰极值静冰载荷计算的关键参数为冰厚和海冰的强度。

国内相关标准和规范对重叠冰的厚度有各自规定。《工程海冰技术规范》(HY/T 047)^[1]指出,渤海各海域重叠冰一般由2~10 cm厚的单层冰多层重叠而成,多层重叠的层次随冰厚的增加而减少,海上少见厚度大于10 cm的单层冰多层重叠现象。在没有实测的重叠冰厚度数据或实测年最大值系列数据过短情况下,重叠冰的设计厚度可按单层冰设计厚度的2.0倍,重叠冰的密度相对于单层冰应降低5%~15%。《中国海冰条件及应用规定》(Q/HSn 3000)^[2]中规定了单层冰和重叠冰厚度之间的关系:重叠冰冰厚为单层冰的1.5~2.0倍。

许多学者通过观测、数值分析以及理论分析方法开展了研究,发现重叠冰在不同海域的厚度有所差异。Babko等^[3]通过在北冰洋边缘海域楚科奇海以北和楚科奇帽以西的地区进行现场实验的观察,指出重叠冰参与了冰厚度分布的过程,重叠冰是秋季冰层中的重要组成部分。Worby等^[4]从南极边缘海域贝灵斯豪森海和阿蒙森海提取出62个冰芯,发现重叠冰的单层平均厚度可达0.9 m,重叠层数可达8层。Melling等^[5]调查了北极 Tuktoyaktuk 半岛 120 km 处的海冰,观测到多达4层的重叠冰,总厚度约为6 m。而在中国的渤海海域,重叠冰厚度通常小于1 m^[6],沿岸的重叠冰最大厚度达0.8 m,一般为0.2 m^[7]。李志军等^[8]基于辽东湾海冰力学性质参数分析得出重叠冰中单层冰的厚度不超过26 cm。此外,各位学者关于重叠冰长度也开展了一定的研究,李春花等^[9]采用理论计算和数值仿真,揭示了风和流的作用力越大海冰的重叠长度越大的规律。季顺迎等^[10]通过现场观测分析了限制渤海重叠冰长度的主要因素为冰板的屈曲破坏

特征。

目前,关于单层冰压缩强度方面的研究较为完善。围绕渤海的莱州湾和辽东湾等海域,李志军等^[11]在辽东湾采集海水加工成冰试样,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。王安良等^[12]对渤海沿岸包括莱州湾、黄河口附近等海域进行了现场测试及冰样采集,分析了其在温度、卤水体积和应力率下的基本特征。隋俊鹏等^[13]在渤海辽东湾沿岸进行了海冰的单轴压缩测试,结果表明,海冰试样的应力—应变曲线表现为韧性破坏、单峰值脆性破坏以及多峰值脆性破坏3种形式。马玉贤等^[14]基于辽东湾海域的海冰现场观测和力学性能测试,分析了该海域海冰的物理性质以及力学性质。此外, HY/T 047^[1]中的计算公式表明单层冰的压缩强度与盐水体积的平方根呈线性相关关系; Q/HSn 3000^[2]中的计算公式表明单层冰压缩强度与有效冰温呈线性相关关系。ISO 19906规范^[15]中的计算公式表明单层冰压缩强度与应变速率和孔隙率相关。综上所述,近年来在渤海海域单层冰的压缩强度方面现已开展了众多的研究,在不同应变速率下其压缩强度变化和破坏模式已得出明确的结论。

在渤海工程结构抗冰设计分析中,通常选取重叠冰和平整冰两者计算冰载荷的最大值作为结构的设计冰载荷。重叠冰的强度是抗冰结构设计中重要的海冰设计条件。HY/T 047^[1]中规定重叠冰单轴压缩强度设计值可通过式(1)计算:

$$\sigma_{cRa} = 1.77 - 0.13T_{iRa} \quad (1)$$

式中: σ_{cRa} 是重叠冰水平方向单轴压缩强度(MPa); T_{iRa} 是重叠冰的温度(°C); 垂直方向单轴压缩强度可取水平方向单轴压缩强度的1.0~1.3倍。Q/HSn 3000^[2]对重叠冰强度的规定为:不同冰区不同重现期重叠冰的压缩强度、弯曲强度、拉伸强度、剪切强度、冻结强度的极值是单层冰的相应值的0.8倍。以上两个规范中的重叠冰强度的建议存在一定差异,而ISO 19906规范^[15]未给出重叠冰强度与对应平整冰的关系,重叠冰的单轴压缩下的破坏特征与单层冰的

相关性尚不够明确。

国内外学者在重叠冰的力学性能方面,已开展了一定研究。Shafrova 和 Høyland^[16]通过模型冰试验得出淡水重叠冰浸没 24 h 的平均冻结强度为 (0.34 ± 0.14) MPa。Bailey 等^[17]通过人工制备重叠冰的方式,发现重叠冰之间的结合剪切强度比平整冰低 30%。陈晓东^[18]将人工制备柱状重叠冰与柱状单层冰作为实验样本,发现柱状冰晶断层的存在会导致重叠冰的压缩强度与脆一脆转变速率的降低,但其仅研究了重叠冰垂向加载方向下的力学特性,未考虑水平加载方向下的重叠冰力学性质。相关学者利用数值仿真建立了重叠冰的力学模型,揭示重叠冰与结构的相互作用^[19-21],本研究将为水平加载方向上重叠冰单轴压缩强度仿真提供更准确的数据参考。

综上所述,国外学者针对重叠冰的研究主要是在近极地附近开展,室内重叠冰的试验主要研究其冻结层的特征;国内关于重叠冰的研究主要集中于重叠冰的生长过程,针对垂直于固结面加载方向的力学特性开展了一定研究,但关于重叠冰和单层冰在破坏特征和强度方面的关系尚不明确。李伟等^[22]指出 Q/HSn 3000^[2]和 HY/T 047^[1]对重叠冰厚度和强度的规定与平台实际观测的结果相差较大,建议开展沿岸和工程海域附近重叠冰力学性能试验,同时在实验室开展重叠冰生成规律及其与结构破坏作用模型试验,研究重叠冰与结构相互作用破坏机理。

目前,有关重叠冰压缩强度的理论支撑和实验数据均略显不足。为了明确重叠冰和单层冰的压缩强度之间的关系,探究重叠冰的破坏特征,本文采用室内测试的方式,研究了不同加载应变速率下重叠冰与对应单层冰压缩强度之间的关系,对比分析了二者破坏模式的差异性,为我国海洋工程结构的抗冰设计中重叠冰压缩强度的取值提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 重叠冰形成过程

李志军等^[8]提出重叠冰的形成机制是,冰层在环境动力驱动下可以爬升到前一块冰层上,在达到平衡时发生断裂,后续冰层继续爬升,当环

境驱动力减小到一定程度时,这些重叠冰就因浮力与重力达到平衡产生呈水平层的多层重叠冰^[8],形成过程如图 1 所示,其中 V_0 和 V_1 分别表示前、后冰板的移动速度。由于天然的重叠海冰不易获取,且难以采集到对应单层冰开展研究,本文基于室内实验模拟重叠冰形成过程,制备冰试样,开展单轴压缩强度测试。控制冰板自上而下生长,分别制作 2 层和 3 层的重叠冰,对比分析重叠冰和单层冰的力学性能。

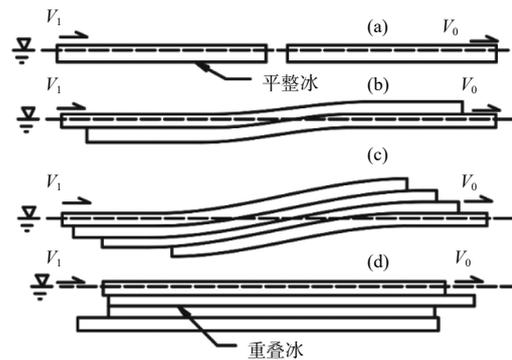


图 1 重叠冰形成过程示意图^[8]

Fig. 1 Schematic diagram of the rafted ice formation process

1.2 重叠冰的制备

室内重叠冰的制备依托于大连理工大学低温实验室开展,由于制冷温度过低会导致冰板在生长过程中的气体无法及时排出,导致冰板表面产生裂纹,因此,室内试验温度设置为 -10 °C。为制备重叠冰,制冰模具的尺寸为 $610 \text{ mm} \times 420 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$,根据溶液的浓度和模具的尺寸,配置溶液高度为 150 mm ,溶液浓度计算方法如下:

$$\omega = \frac{m_a}{m_a + m_b} \quad (2)$$

式中: ω 为溶液的浓度; m_a 为盐的质量; m_b 为水的质量。

在制备过程中,为了使冰板自上而下生长,在制冰模具的四周安装保温板,仅留出水面直接与冷空气接触,防止从侧壁和底部结冰。使用精度为 0.01 g 的电子秤,配置盐度为 8 的海水溶液,将隔板固定于制冰模具中间。当冰板的厚度生长到 40 mm 时移除隔板,将分隔开的 2 层和 3 层冰板重叠起来,之后继续冻结 24 h ,最终得到 2 层和 3 层的重叠冰。选取表面无微裂纹、内

部无大裂纹的试样为本次试验的重叠冰试样,使用手持式折射仪(WZ-211ATC,盐度量程范围0~100)测得试样盐度为4~6。

实验室制备的2层重叠冰试样如图2a所示,2层重叠冰是由上层冰板、下层冰板以及中间的溶液层固结而成。随着冷冻时间的延长,

溶液层转变成颗粒状的冻结层,上层和下层冰板则为柱状冰,从结构上来看,该试样与文献^[17]中制备的重叠冰试样一致(图2b),其生长过程模拟了真实海域中的重叠冰形成过程。此外,试验中针对每组重叠冰,制备了对应的单层冰作为对照组试样。

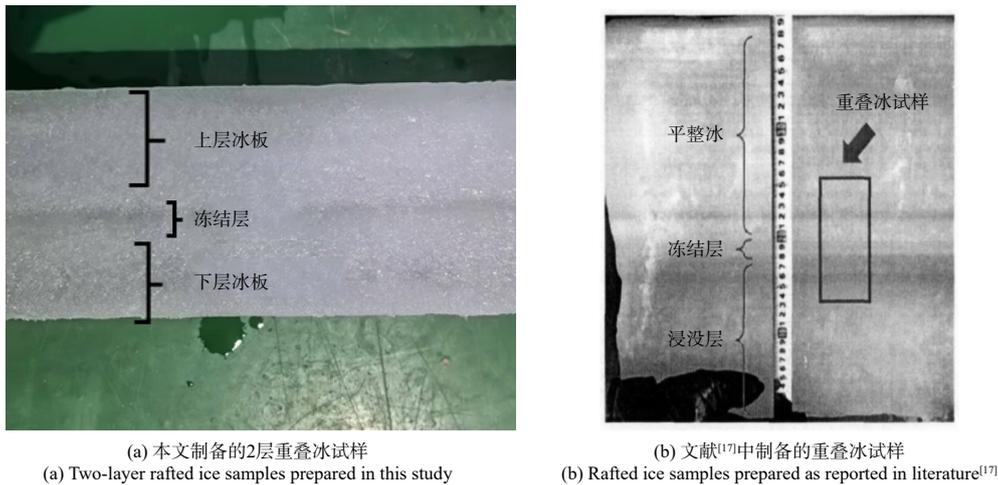


图2 实验室制备的重叠冰特征

Fig. 2 Characteristics of rafted ice samples prepared in the laboratory

1.3 重叠冰压缩强度测试

试验中2层、3层重叠冰和单层冰的试样厚度为75~100 mm,为了最大限度地保留重叠冰原有的晶体结构,对其不做过多切削,减小试验误差。在遵循标准件尺寸70 mm×70 mm×175 mm(HY/T 047^[1]中建议的试样尺寸)的基础上进行适当放缩。通过切割机将试样尺寸切割至合适的大小(保障其长宽高的比例与标准试样相同),同时对重叠冰以及对照组进行取样,并通过盐度计测量试样盐度。记录各层冰板的厚度,将切割好的试样储存在低温实验室内。

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^[23],冰板受到结构水平方向上(与冰晶生长方向垂直)的挤压作用,故本试验采用水平加载方向。采用万能试验机在低温环境下对冰试样开展单轴压缩试验,通过改变加载速度研究冰试样力学性能,如图3所示。为避免端部效应,试验过程中在试样的上下两端加装垫块。

提取实验中的最大加载力作为冰试样破坏

载荷,将此载荷与试样的截面积比值定义为冰的单轴压缩强度,计算公式如下:

$$\sigma_c = \frac{F_{\max}}{A_i} \quad (3)$$

式中: σ_c 为重叠冰单轴压缩强度; F_{\max} 为最大加载力; A_i 为冰试样横截面面积。

为了探究重叠冰在不同应变速率下的破坏模式及压缩强度的变化规律,本试验中考虑的试样应变速率为 $10^{-4} \sim 10^{-2}$ /s,环境温度控制在 $-4 \text{ } ^\circ\text{C} \sim -8 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。



图3 重叠冰试样单轴压缩试验

Fig. 3 Uniaxial compression test on rafted ice samples

2 结果与讨论

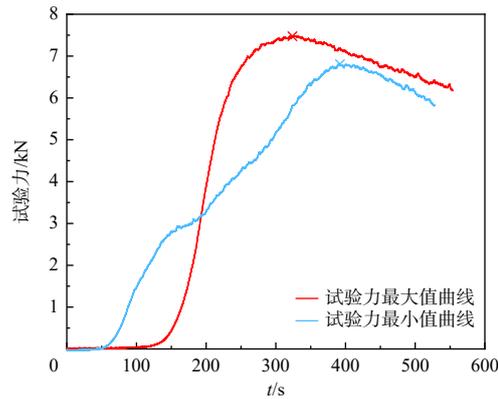
2.1 重叠冰与平整冰的破坏模式分析

对多组重叠冰和单层冰的试样进行筛选,选取上下表面相对平整、内部无明显缺陷和孔洞的冰板作为试验的试样。将整块冰板切割成标准试样,去除切割过程中发生局部破裂或内部缺陷明显的试样,总计获取 83 个试样,在不同应变

速率下,重叠冰和平整冰的破坏特征和加载力曲线分别如图 4 和图 5 所示。试样的破坏图像和加载曲线表明,重叠冰和单层冰均存在韧性破坏、韧—脆转变、脆性破坏 3 个特征。同时,由于海冰内部结构的复杂性,重叠冰和单层冰的加载力最大值和最小值存在一定的离散性。此外,通过试验数据分析发现,不同应变速率下重叠冰与单层冰的破坏特征存在差异。



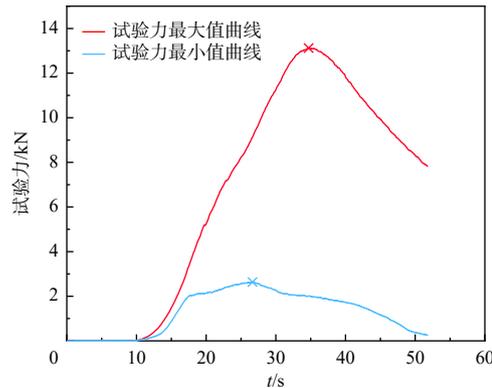
(a) 应变速率为 10^{-4} /s时破坏图



(b) 应变速率为 10^{-4} /s时加载力曲线



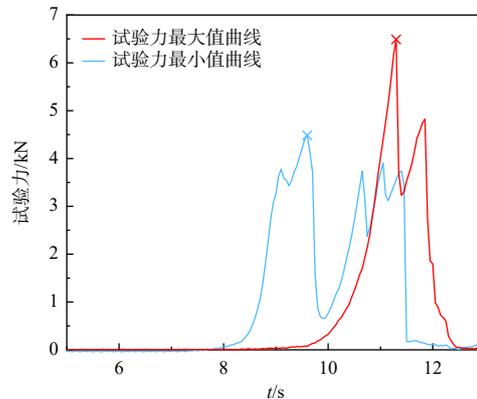
(c) 应变速率为 10^{-3} /s时破坏图



(d) 应变速率为 10^{-3} /s时加载力曲线



(e) 应变速率为 10^{-2} /s时破坏图



(f) 应变速率为 10^{-2} /s时加载力曲线

图 4 重叠冰的破坏模式及加载力曲线

Fig. 4 Failure modes and loading force curves of rafted ice

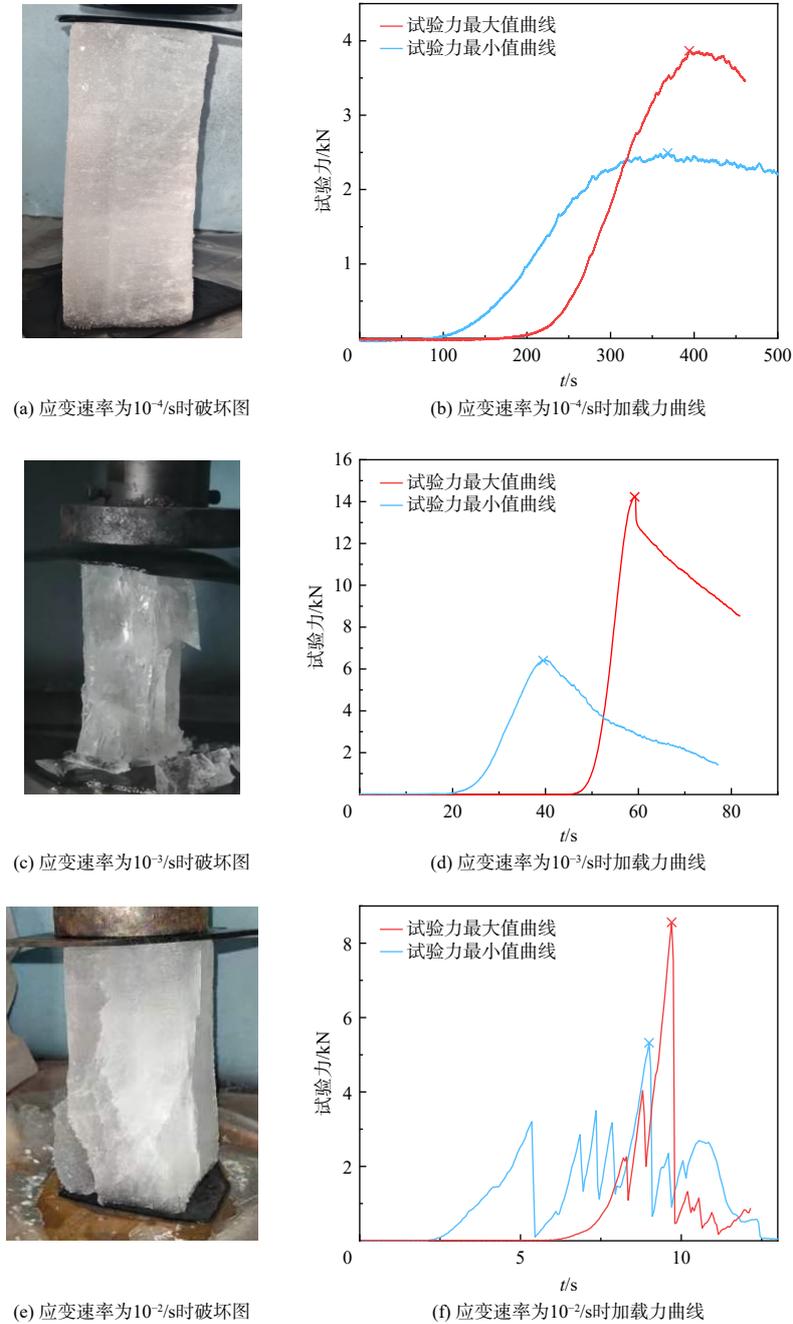


图 5 单层冰的破坏模式及加载力曲线

Fig. 5 Failure modes and loading force curves of single-layer ice

当应变速率为 10^{-4} /s 时, 重叠冰达到加载力峰值时试样没有明显的破坏特征, 主要表现为鼓胀变形(图 4 a)。其加载力曲线达到峰值后缓慢降低(图 4 b), 表现出韧性破坏特征, 与单层冰表现出相同的力学特性(图 5 a 和图 5 b)。

当应变速率为 10^{-3} /s 时, 重叠冰达到加载力峰值时试样发生劈裂破坏, 大部分试样沿着冻结层形成贯穿裂纹, 试样沿此裂纹发生劈裂破坏

(图 4 c), 其加载力曲线达到峰值后缓慢降低(图 4 d), 表现出脆性破坏特征。在此应变速率下, 单层冰试样的贯穿裂纹发生位置较为随机, 试样沿多个局部裂纹发生破碎, 直至试样发生碎裂或劈裂破坏(图 5 c), 当加载力曲线达到峰值时, 加载力慢慢下降(图 5 d), 试样主要表现出韧—脆转变特征。

当应变速率为 10^{-2} /s 时, 随着加载力的增

加,重叠冰试样裂纹在冻结层形成,逐渐发展成沿冻结层的贯穿裂纹,试样沿此裂纹发生劈裂破坏(图4e),其加载力曲线达到峰值后突然降低(图4f),表现出脆性破坏特征。单层冰在此应变速率下达到加载力峰值时试样多个位置出现裂纹,试样也存在贯穿裂纹,但发生位置不固定(图5e),其加载力曲线达到峰值时,单层冰发生局部破坏,冰力下降(图5f),表现出脆性破坏特征。

上述分析表明,当试样的应变速率为 $10^{-4} \sim 10^{-2}$ /s 时,重叠冰大部分发生劈裂破坏,小部分发生碎裂破坏和韧性破坏。碎裂破坏的位置多发生在试样的顶端,试样局部区域微裂纹的尖端应力集中程度更高,裂纹不断累积扩展释放能量;多个斜向裂纹如此反复生成,造成了试样的多级局部碎裂破坏。劈裂破坏位置主要发生在冻结层,首先从冻结层的顶部和底部出现裂纹,不断地向中间拓展,最终形成贯穿整个试样的大裂纹,破坏过程如图6所示。而韧性破坏的试样则不出现明显裂纹,其试样发生塑性变形。相比于重叠冰,单层冰发生劈裂破坏和碎裂破坏时贯穿裂纹随机出现在试样的不同位置。重叠冰是由多个冰板叠加并在海水的作用下固结在一起的,其中间的冻结层相对于上下层的柱状冰强度更低,破坏裂纹更容易发生在此位置。同时,重叠冰相对于单层冰更脆,破坏模式也更倾向脆性。

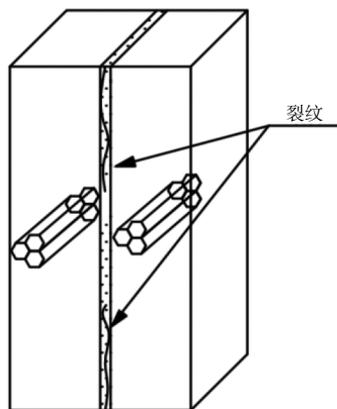


图6 重叠冰劈裂破坏裂纹形成示意图

Fig. 6 Schematic diagram of crack formation during splitting failure of rafted ice

2.2 重叠冰与平整冰的压缩强度分析

海冰压缩强度受晶体结构、海冰温度、盐度、应变速率等多种因素的共同影响。本节重点分析应变速率对重叠冰和单层冰压缩强度的影响,结合试验数据对比不同类型冰板在不同应变速率下的压缩强度,探讨冰板特征对其强度的影响规律。

由于海冰压缩强度具有一定的离散性,为减小单次制冰带来的误差,试验开展了两次重叠冰和单层冰的制备,制冰流程和参数基本相同(0325组次和0404组次)。将本试验中不同类型冰板分别命名为0325-C8-I3(3层重叠冰)、0325-C8-I2(2层重叠冰)、0325-C8-I1(单层冰)、0404-C8-I3(3层重叠冰)、0404-C8-I2(2层重叠冰)及0404-C8-I1(单层冰)。

其中,编号为0325-C8-I3、0325-C8-I2和0325-C8-I1冰板试样,在应变速率为 $10^{-4} \sim 10^{-2}$ /s 范围内,平均压缩强度范围分别为0.873~1.617 MPa、1.013~1.617 MPa和1.141~2.514 MPa;编号为0404-C8-I3、0404-C8-I2和0404-C8-I1冰板试样,平均压缩强度范围分别为0.475~1.473 MPa、1.383~1.643 MPa和0.903~1.6439 MPa。具体数据列于表1。

基于编号0325和0404试样试验数据绘制压缩强度和应变速率的散点图(图7—图9)。结果表明,重叠冰与单层冰的韧—脆转变区间的应变速率均在 10^{-3} /s 左右。当应变速率为 10^{-4} /s 时,单层冰的压缩强度均值较小(0.903 MPa),3层重叠冰压缩强度均值是单层冰压缩强度的1.342倍,2层重叠冰压缩强度均值是单层冰压缩强度的1.353倍。这是由于重叠冰的冻结层在低速加载下可能表现出较强的应力传递能力,冻结层在冰板之间分担部分应力,减缓了单层冰中常见的应力集中效应,导致其压缩强度均值高于单层冰。

当应变速率为 10^{-3} /s 时,单层冰的压缩强度均值达到最大(1.795 MPa),3层重叠冰压缩强度是单层冰压缩强度的0.498倍,2层重叠冰压缩强度是单层冰压缩强度的0.901倍。这3种冰板的压缩强度最大值均出现在应变速率为 10^{-3} /s 附近,其压缩强度均呈现先增加后减小的趋势。

表 1 重叠冰与单层冰压缩强度均值数据

Tab.1 Mean compressive strength data for rafted ice and single-layer ice

试验编号	应变速率/s	试验组数	均值/MPa
0325-C8-13	10^{-3}	1	1.617
	2×10^{-3}	1	0.873
	3×10^{-3}	1	1.428
	5×10^{-3}	2	1.221
	10^{-2}	1	1.002
0325-C8-12	10^{-4}	2	1.023
	10^{-3}	4	1.617
	3×10^{-3}	1	1.511
	5×10^{-3}	2	1.376
	10^{-2}	6	1.013
0325-C8-11	10^{-3}	2	2.514
	2×10^{-3}	3	1.563
	3×10^{-3}	3	1.141
	5×10^{-3}	4	1.144
	10^{-2}	2	1.433
0404-C8-13	10^{-4}	4	1.211
	3×10^{-4}	5	1.473
	5×10^{-4}	3	0.921
	7×10^{-4}	2	0.695
	10^{-3}	7	0.757
0404-C8-12	5×10^{-3}	2	0.475
	10^{-4}	1	1.643
	3×10^{-4}	2	1.638
0404-C8-11	5×10^{-3}	1	1.383
	10^{-4}	4	0.903
	3×10^{-4}	5	1.573
	5×10^{-4}	3	1.643
	7×10^{-4}	2	1.566
	10^{-3}	5	1.508
	5×10^{-3}	2	1.229

由于冰板在压强最大时,对结构造成的危害最大,本文重点分析应变速率为 10^{-3} /s 时重叠冰与单层冰的关系。当单层冰的应变速率为 10^{-3} /s 时,压缩强度最大值为 2.65 MPa; 当 3 层重叠冰的应变速率为 3×10^{-4} /s 和 1×10^{-3} /s 时,压缩强度最大值为 1.85 MPa, 是单层冰最大值的 0.69 倍; 当 2 层重叠冰的应变速率为 10^{-3} /s 时,压缩强度最大值为 2.0 MPa, 是单层冰最大值的 0.75

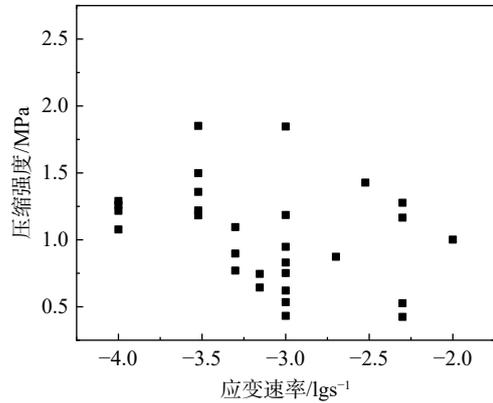


图 7 3 层重叠压缩强度与应变速率的关系

Fig. 7 Relationship between compressive strength and strain rate for three-layer rafted ice

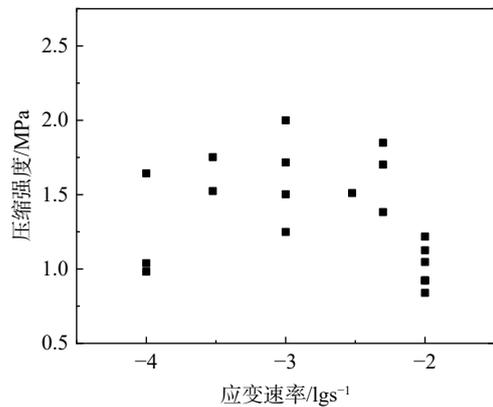


图 8 2 层重叠冰压缩强度与应变速率的关系

Fig. 8 Relationship between compressive strength and strain rate for two-layer rafted ice

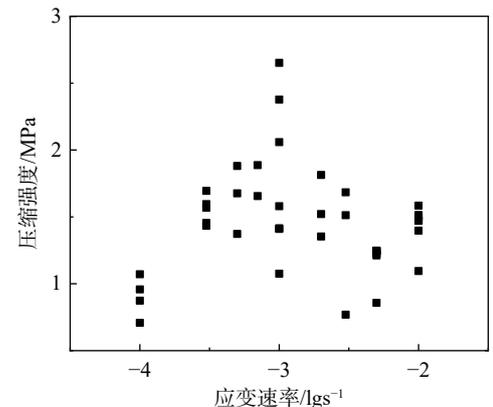


图 9 单层冰压缩强度与应变速率的关系

Fig. 9 Relationship between compressive strength and strain rate for single-layer ice

倍。由于冻结层的强度较低,重叠冰破坏主要发生在冻结层,造成重叠冰的强度降低。冻结层的

层数越多,其冻结层发生破坏的概率越大,重叠冰的强度越低。

当应变速率为 10^{-2} /s 时,单层冰的压缩强度均值为 1.433 MPa,3层重叠冰压缩强度是单层冰压缩强度的 0.845 倍,2层重叠冰压缩强度是单层冰压缩强度的 0.707 倍。相对于单层冰,重叠冰的压缩强度最大值集中出现在应变速率 10^{-3} /s 附近,重叠冰压缩强度最大值较为分散。

为了研究 3 种冰板最大值的离散程度,分别选取试验样本总量中的前 20% 为研究对象,计算得到试样压缩强度的标准差(表 2),可以看出单层冰的标准差最小(0.317),这一现象主要是由于重叠冰相较于单层冰具有更加复杂的冻结层,存在较多的不确定性。

表 2 重叠冰与单层冰最大值标准差分析

Tab.2 Standard deviation analysis of the maximum values of rafted ice and single-layer ice

冰板类型	单层冰	2层重叠冰	3层重叠冰
标准差	0.317	0.501	0.514

天然条件下的重叠冰是在风、潮流等外力作用下由单层冰重叠冻结形成,其固结层生长于海洋环境中。本文结合天然条件下重叠冰的形成过程,在实验室内制备了重叠冰和单层冰,探讨了相同生长环境下两者的力学性能差异,重叠冰受冻结层的影响,其压缩强度小于相同环境下的单层冰。

3 结论

(1)重叠冰与单层冰的单轴压缩试验研究结果表明,在应变速率为 $10^{-4} \sim 10^{-2}$ /s 时,重叠冰主要呈现沿冻结层的劈裂破坏,单层冰呈现 3 种破坏特征(韧性破坏、劈裂破坏、碎裂破坏),破坏发生位置没有明显规律;

(2)在单轴压缩试验中,重叠冰与单层冰的压缩强度均在应变速率 10^{-3} /s 附近达到最大,两者均存在韧性破坏和脆性破坏特性;与单层冰相比,重叠冰发生韧—脆转变的加载速率范围更广;

(3)试验发现,重叠冰的破坏主要发生在冻结层,冻结层强度较低,使得重叠冰的最大压缩

强度是同条件下单层冰的 0.69 ~ 0.83 倍。

(4)由于天然重叠冰的采集工作具有很大难度,未来可通过对天然重叠冰的产生与生长过程开展现场观测,明确天然重叠冰物理特性与生长的关系,进一步指导重叠冰力学性能的深入研究。

参考文献:

- [1] HY/T 047—2016. 工程海冰技术规范 [S]. 国家海洋局,北京:中国标准出版社,2017.
- [2] Q/HSN 3000—2002. 中国海冰条件及应用规定 [S]. 中国海洋石油总公司,北京,2002.
- [3] BABKO O, ROTHROCK D A, MAYKUT G A. Role of rafting in the mechanical redistribution of sea ice thickness[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2002, 107(C8): 3113.
- [4] WORBY A P, JEFFRIES M O, WEEKS W F, et al. The thickness distribution of sea ice and snow cover during late winter in the Bellingshausen and Amundsen Seas, Antarctica[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1996, 101(C12): 28441-28455.
- [5] MELLING H, TOPHAM D R, RIEDEL D. Topography of the upper and lower surfaces of 10 hectares of deformed sea ice[J]. Cold Regions Science and Technology, 1993, 21(4): 349-369.
- [6] 杨国金,刘春厚,张涛. 渤海海冰工程图集 [M]. 北京:海洋出版社,1991.
- [7] 于永海,王仁树,陈伟斌,等. 渤海湾南部沿岸海区 1992 ~ 1995 年结冰特征与分析 [J]. 海洋环境科学, 1996, 15(2): 74-79.
- [8] 李志军,丁德文,隋吉学,等. 辽东湾多层重叠冰单层厚度的理论分析 [J]. 海洋环境科学, 1997, 16(4): 21-25.
- [9] 李春花,孙鹤泉. 海冰重叠动力条件分析 [J]. 海洋工程, 2011, 29(1): 68-74.
- [10] 季顺迎,岳前进,聂建新. 渤海海冰的重叠长度分析 [J]. 中国海洋平台, 2001, 16(5/6): 12-16.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 隋俊鹏,李宝辉,赵倩,等. 卤水体积和应变率影响下的渤海海冰单轴压缩强度分布 [J]. 海洋预报, 2021, 38(4): 38-44.
- [14] 马玉贤,于福祥,田野,等. 辽东湾东岸海冰物理力学性质的基本特性 [J]. 海洋环境科学, 2023, 42(5): 780-787.
- [15] ISO-19906. Petroleum and natural gas industries - Arctic offshore structures[S]. Geneva Switzerland, International Organization for Standardization, 2019.
- [16] SHAFROVA S, HØYLAND K V. The freeze-bond strength in first-year ice ridges. Small-scale field and laboratory experi-

- ments[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2008, 54(1): 54-71.
- [17] BAILEY E, SAMMONDS P R, FELTHAM D L. The consolidation and bond strength of rafted sea ice[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2012, 83/84: 37-48.
- [18] 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.
- [19] NI B Y, WANG Y T, XU Y, et al. Numerical simulation of ship collision with rafted ice based on cohesive element method[J]. *Journal of Marine Science and Application*, 2024, 23(1): 127-136.
- [20] HUANG J Y, DIAO F, DING S F, et al. A study on the ice resistance characteristics of ships in rafted ice based on the circumferential crack method[J]. *Water*, 2024, 16(6): 854.
- [21] 张行初, 冯国庆, 朱文博, 等. 基于 LS-DYNA 的冰材料模型二次开发及重叠冰应用 [J]. *江苏科技大学学报 (自然科学版)*, 2023, 37(1): 9-14.
- [22] 李伟, 尹汉军, 付殿福, 等. 中国海洋平台结构抗冰设计关键问题及研究建议 [J]. *中国海上油气*, 2024, 36(4): 199-211.
- [23] 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.

(本文编辑: 胡莹莹)

(上接第 523 页)

- [21] 何伟东, 孙鹏飞, 张秋丰. 北部湾北部海域夏季浮游细菌空间分布特征及其影响因素 [J]. *上海海洋大学学报*, 2022, 31(2): 433-444.
- [22] YANNARELL A C, TRIPLETT E W. Geographic and environmental sources of variation in lake bacterial community composition[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2005, 71(1): 227-239.
- [23] 刘乐冕, 杨军, 余小青, 等. 厦门后溪流域沿城乡梯度浮游细菌多样性及其与环境因子的关系 [J]. *应用与环境生物学报*, 2012, 18(4): 591-598.
- [24] SEYMOUR J R, AMIN S A, RAINA J B, et al. Zooming in on the phycosphere: the ecological interface for phytoplankton-bacteria relationships[J]. *Nature Microbiology*, 2017, 2(7): 17065.
- [25] 李清雪, 赵海萍, 陶建华. 渤海湾海域浮游细菌的生态研究 [J]. *海洋技术*, 2005, 24(4): 50-53,56.
- [26] 肖慧. 渤海湾近岸海域的细菌学研究及其在海岸带环境质量评价中的应用 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005: 117-118.
- [27] SCHREIER J E. Dynamics of bacteria and phytoplankton in the surface ocean[J]. *Encyclopedia of Ocean Sciences*, 2019, 1: 546-552.
- [28] 马玉, 王翔, 许欣, 等. 大亚湾水体营养盐分布特征及其生态环境效应 [J]. *中国环境监测*, 2023, 39(6): 110-122.
- [29] SONG X Y, LI Y, HUANG Y D, et al. Nitrogen and phosphorus enrichments alter the dynamics of the plankton community in Daya Bay, northern South China Sea: results of mesocosm studies[J]. *Marine and Freshwater Research*, 2021, 72(11): 1632-1642.
- [30] 奚琛, 林宗轩, 萨如拉, 等. 基于双浮标连续监测资料分析大亚湾西南部海域水体环境变化特征及其影响因素 [J]. *热带海洋学报*, 2024, 43(4): 153-164.

(本文编辑: 曲丽梅)