

DOI: CNKI: 32-4309/P. 20110313. 2241. 026

环渤海海冰弯曲强度的试验测试及特性分析

季顺迎¹, 王安良¹, 苏 洁², 岳前进¹

(1. 大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116023; 2. 中国海洋大学海洋环境学院, 山东 青岛 266003)

摘要: 在渤海冰区油气开发中, 海冰物理力学性质对海洋结构设计、海冰动力学过程均有重要影响。目前, 随着渤海冰区锥体海洋平台的增加, 对海冰弯曲强度的研究具有重要意义。对环渤海沿岸9个测点的海冰弯曲强度进行了现场和室内测试, 同时对影响海冰弯曲强度的海冰盐度、温度进行了测试; 分析了莱州湾、辽东湾西岸和辽东湾东岸等不同测点海冰弯曲强度的特性, 讨论了海冰弯曲强度与卤水体积(温度和盐度)、应力速率的对应关系; 依据海冰弯曲强度与卤水体积的平方根呈负指数关系, 与加载速率呈线性关系的特点, 确定了海冰弯曲强度的双参数推算公式, 为冰区锥体、斜面结构海冰弯曲破坏时的冰荷载设计提供了参考依据。

关键词: 渤海; 海冰; 弯曲强度; 试验测试

中图分类号: P731.15 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2011)02-0266-07

冰区海洋结构在设计、建造和服役过程中, 冰荷载是必须要考虑到的重要环境荷载。冰荷载的大小、形式不仅与海洋结构物的形状、尺寸有关, 同时还受海冰物理和力学特性的影响。受气象、水文条件的影响, 不同海域海冰的盐度、密度和温度等物理性质存在很大差异, 这对海冰的压缩强度、弯曲强度、剪切强度等力学性质有很大的影响。因此, 对油气作业区的海冰物理力学性质进行测试是冰区油气工程开发中的重要研究内容^[1]。在抗冰锥体海洋平台、人工岛式海洋平台、斜面护坡、破冰船等海洋结构中, 海冰以弯曲破坏模型为主, 冰荷载的大小由其弯曲强度控制^[2]。此外, 海冰在波浪作用下的动力破碎、重叠和堆积特性, 以及冰面承载力均与海冰的弯曲强度密切相关。有关海冰弯曲强度的试验研究已开展了近半个世纪, 主要发展了悬臂梁试验和简支梁试验两种测试方法^[3-4]。悬臂梁试验一般在现场进行大尺度原位测试, 通过在冰面上制作悬臂梁模型测得在真实温度梯度和冰厚下的海冰弯曲强度; 简支梁试验包括三点弯曲和四点弯曲, 其需要的试样尺寸相对较小, 操作简单, 是室内试验的主要手段^[4-5]。海冰是一种复杂的晶体材料, 其冰晶大小和分布特性、温度、盐度、加载方向和速率、试样大小等因素对弯曲强度均有很大的影响^[4,6-8]。Timco等^[4]归纳了不同研究者的现场和室内试验资料, 确定了海冰弯曲强度与卤水体积的平方根成负指数关系, 该指数关系得到了后续试验的验证。中国渤海海冰的现场和室内试验结果表明, 海冰弯曲强度与卤水体积的平方根成线性关系^[10-11]。海冰强度对加载速率的敏感性主要体现在单轴压缩试验中, 并在不同加载速率下表现出明显的韧脆转化特性^[12]。对于海冰的弯曲强度, 以往的试验结果却表明加载速率的影响不显著^[4,9]。Timco等^[9]指出, 这可能与试验样本不足有关。随后, Gagnon等^[13]的试验结果表明海冰的弯曲强度随加载速率的增加而增大。此外, 在20世纪90年代初的渤海海冰物理力学性质研究中, 深入讨论了海冰弯曲强度对加载速率的敏感性, 并得到海冰弯曲强度随加载速率的增加呈先增加再降低的规律^[10-11]。海冰弯曲破坏是否也同压缩破坏一样存在一个韧脆转化特性, 还需要更充分的试验验证。因此, 为进一步分析加载速率对

收稿日期: 2010-07-05; **网络出版时间:** 2011-03-13

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20110313.2241.026.html>

基金项目: 公益性行业科研专项经费资助项目(200805009; 201105016); 新世纪优秀人才计划资助项目(2009-7); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(DUT10LK09)

作者简介: 季顺迎(1972-), 男, 河北武邑人, 副教授, 博士, 主要从事工程海冰数值模式研究。

E-mail: jisy@dlut.edu.cn

海冰弯曲强度的影响还需要深入地开展试验研究。

本文在2008~2010年的两个冬季,对环渤海沿岸9个不同测点的海冰弯曲强度进行了现场和室内试验测试,并重点分析了海冰卤水体积(盐度和温度)、应力速率对海冰弯曲强度的影响,得到了相应的函数关系,为确定不同条件下海冰弯曲强度提供了有力的借鉴。

1 环渤海海冰弯曲强度的测试地点和试样采集

2008~2010年两个冬季,对环渤海沿岸进行了系统的海冰物理力学性质实地调查,并对海冰的弯曲强度进行了现场测试和冰样采集,测点和冰样采集点的分布如图1所示。测点位置的分布情况与对应的名称如图1与表1所示。海冰弯曲强度受冰晶结构、盐度、温度、加载方向等诸多因素的影响,在现场冰样的采集和试验中选择合理的方法很重要。本文的工作主要基于国内外相关海冰的试验规范,并考虑到渤海海冰的实际状况进行的。

在渤海海冰弯曲强度试验中,选取近岸平整固定冰作为试验冰样,并在海冰采样过程中同步测量气温和海冰的盐度剖面。海冰属于典型的脆性材料,其力学性质受温度、盐度、材料缺陷等因素显著影响,因此海冰采样、运输和存储过程中需要尽力保持海冰的原始性质。在两个冬季的环渤海海冰弯曲强度测试中共完成了155个试样,室内测试了81个。不同测点的相应测试数据列于表1中,其中海冰盐度为平均值。

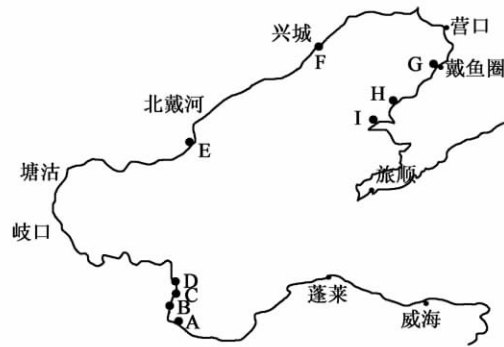


图1 环渤海海冰弯曲强度的测点分布
Fig.1 Locations of sea ice flexural strength experiment around the Bohai Sea

表1 环渤海的海冰现场和室内弯曲强度测试状况

Table 1 Sea ice flexural strength experiment in situ and in door around the Bohai Sea

采样地点		采样日期	试样数目	冰厚/cm	气温/°C	海冰盐度/ 10^{-3}
莱州湾	A 海红港	2009-01-23	6	20	-11.1	6.3
	B 观海栈桥	2010-01-22	27	17	-4.5	4.7
	C 红光码头	2009-01-21	21	15	-6.5	5.6
	D 小岛河	2009-01-20	8	11	-2.0	5.6
辽东湾西岸	E 南堡镇	2010-01-22	24	20	-3.3	5.3
	F 兴城	2010-01-21	22	33	-5.5	4.1
辽东湾东岸	G 鲅鱼圈	2009-01-23	12	32	-5.4	5.8
	H 大嘴子	2009-02-01	15	15	-5.0	4.4
	I 长兴岛	2009-02-02	5	28	-9.0	4.8
		2009-02-02	5	30	-1.5	4.3
		2009-02-02	11	18	-1.5	4.1

2 海冰弯曲强度的试验方法及初步测试结果

本文采用了三点弯曲试验方法,加载方式如图2所示,其中 L 为冰样长度, L_0 为冰样两个加载点间的距离, h 为冰样厚度, b 为冰样宽度,如图2所示。由于海冰在自然条件下受生长过程和环境条件的影响,海冰盐度和晶体结构的垂直剖面存在一定的差异,并导致力学性质的不同。在海冰弯曲强度试验中,试样下端面产生的拉伸应力是海冰弯曲强度的控制因素。因此,在海冰弯曲强度试验中,试样的不同放置方式会导致试验结果的不同^[4]。在海冰切割时使试样的长轴平行于冰面,试验时将试样上侧置为海冰的上表面,使冰样在冰厚方向的下表面受拉破坏。试验中海冰试样取为 $75\text{ mm} \times 75\text{ mm} \times 700\text{ mm}$ 的长方体。测试过程中,在不同加载速率下施加荷载直至冰样弯曲破坏,并记录不同时刻的作用力大小。

根据简支梁的受力特点,作用力为 P 时的海冰试样中的最大横截面上正应力为

$$\sigma = \frac{3}{2} \frac{PL_0}{bh^2} \tag{1}$$

式中 P 为海冰试样上的作用力。海冰弯曲强度测试中，典型的弯曲应力 σ 时程曲线如图 3 所示。当海冰试样发生弯曲破坏时，弯曲正应力达到最大值 σ_{max} ，此即为海冰的弯曲强度 $\sigma_f = \sigma_{max}$ 。由图 3 还可以确定出海冰的应力率 $\dot{\sigma}$ ，即应力达到最大值 σ_{max} 前的平均斜率。该试验中的弯曲强度 $\sigma_f = 1.16\text{MPa}$ ，应力率 $\dot{\sigma} = 0.37\text{MPa/s}$ ，冰温为 -8.6°C 。

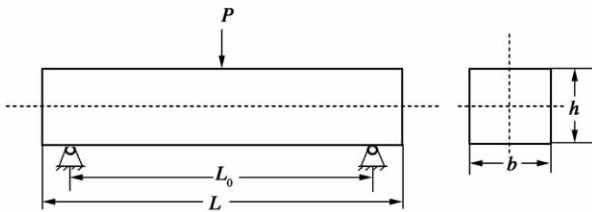


图 2 海冰弯曲强度测试的三点弯曲方法示意图

Fig. 2 Sketch of three points bending method for sea ice flexural strength experiment

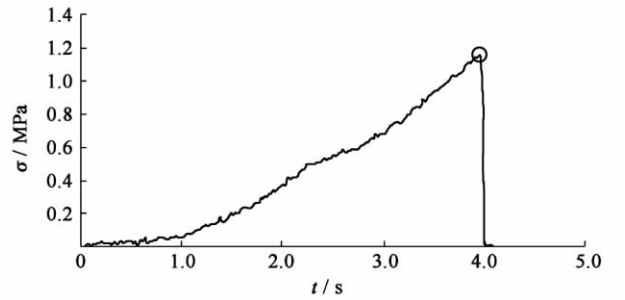


图 3 海冰弯曲强度测试的应力时程曲线

Fig. 3 Stress-time curve of sea ice flexural strength experiment

采用以上三点弯曲试验方法对环渤海 9 个测点的海冰弯曲强度进行了两个冬季的现场和室内测试，试验中海冰的温度、盐度、卤水体积和加载速率的均值列于表 2 中。表 2 中列出了不同测点的弯曲强度的最大值、最小值和均值。为进一步分析不同海域的海冰弯曲强度特性，将莱州湾、辽东湾西岸和辽东湾东岸的海冰弯曲强度及相应参数进行了统计分析，结果如表 3 所示。

表 2 环渤海不同测点海冰弯曲强度统计分析

Table 2 Statistical analysis of sea ice flexural strength of various experiment points around the Bohai Sea

编号	地点	冰温/ $^\circ\text{C}$	盐度/ 10^{-3}	卤水体积/ 10^{-3}	加载速率/ $(\text{MPa} \cdot \text{s}^{-1})$	弯曲强度/MPa		
						最大值	最小值	平均值
A	海红港	-6.56	5.59	55.22	0.42	1.89	0.19	0.88
B	观海栈桥	-2.96	5.55	144.91	0.44	1.26	0.23	0.60
C	红光码头	-5.58	5.36	68.10	0.45	1.94	0.36	0.99
D	小岛河	-7.50	4.14	39.12	0.28	1.45	0.31	0.80
E	南堡镇	-3.39	5.84	104.86	0.86	1.53	0.57	1.03
F	兴城	-4.35	4.38	69.34	0.37	1.66	0.21	0.67
G	鲅鱼圈	-8.78	4.80	29.74	0.40	1.89	0.82	1.22
H	大嘴子	-6.66	4.30	32.91	0.73	1.79	1.41	1.59
I	长兴岛	-3.92	4.06	114.77	0.22	1.17	0.15	0.50

表 3 渤海不同海域海冰弯曲强度的统计分析

Table 3 Statistic analysis of sea ice flexural strength for different regions of the Bohai Sea

海域	冰温/ $^\circ\text{C}$	盐度/ 10^{-3}	卤水体积/ 10^{-3}	加载速率/ $(\text{MPa} \cdot \text{s}^{-1})$	弯曲强度/MPa		
					最大值	最小值	平均值
莱州湾	-5.73	5.22	70.13	0.40	1.94	0.19	0.84
辽东湾西岸	-3.93	5.03	84.22	0.59	1.66	0.21	0.83
辽东湾东岸	-5.73	4.30	68.49	0.38	1.89	0.15	0.93

3 海冰弯曲强度的影响因素分析

海冰弯曲强度受冰晶结构、卤水体积(温度和盐度)和加载速率等诸多因素的影响。前期研究多考虑单个因素对海冰弯曲强度的影响，确定了不同的函数关系。然而，海冰弯曲强度是诸多影响因素耦合作用的结果。为确定卤水体积和加载速率对海冰弯曲强度的影响，本文依据环渤海海冰弯曲强度的测试结果对海冰弯

曲强度的影响因素进行详细的讨论和分析。

3.1 海冰弯曲强度的单因素影响分析

3.1.1 卤水体积影响

在海冰弯曲强度的影响因素中, 卤水体积最为显著, 也是以往工作重点关注的研究内容。Timco 等^[4]通过分析当时的试验数据, 发现海冰弯曲强度与卤水体积的平方根成呈指数关系。

$$\sigma_f = 1.76e^{-5.88\sqrt{v_b}} \quad (2)$$

式中 σ_f 为海冰弯曲强度, MPa; v_b 为海冰卤水体积, 10^{-3} , 它与海冰温度和盐度的关系为^[14]

$$v_b = S \left(0.532 + \frac{49.185}{|T|} \right), \quad -0.5^\circ\text{C} \geq T \geq -22.9^\circ\text{C} \quad (3)$$

式中 T 为冰温, $^\circ\text{C}$; S 为海冰盐度, 10^{-3} 。

本文依据环渤海海冰弯曲强度的现场和室内测试的 155 个试验结果, 海冰卤水体积与弯曲强度的对应关系如图 4 所示。依据式(2)所示的指数形式, 拟合得

$$\sigma_f = 2.41e^{-4.29\sqrt{v_b}} \quad (4)$$

在图 4 中给出了式(2)的拟合曲线作为对比, 可以发现渤海海冰弯曲强度的测试结果要高于 Timco 等^[4]的统计结果。Barrette 等^[9]通过离心机试验确定的海冰弯曲强度也略高于式(2)的统计值。除了式(2)所示的指数函数外, 也有研究表明海冰的弯曲强度与卤水体积的平方根成线性关系^[8]。从图 4 所示的本文试验结果可发现, σ_f 和 $\sqrt{v_b}$ 更加符合指数关系。

3.1.2 冰温影响

温度是影响海冰卤水体积的两个重要因素之一, 并最终影响到海冰的弯曲强度。然而, 为更加直接地分析海冰温度 T 对弯曲强度 σ_f 的影响, Timco 等诸多研究者也讨论了 T 与 σ_f 的关系^[4,10,13]。张明元等^[10]和 Blanchet^[8]发现 T 与 σ_f 具有良好的线性关系。本文将 155 个试样的弯曲强度与冰温的关系绘于图 5 中, 并通过线性拟合, 得

$$\sigma_f = 0.35 - 0.09T \quad (5)$$

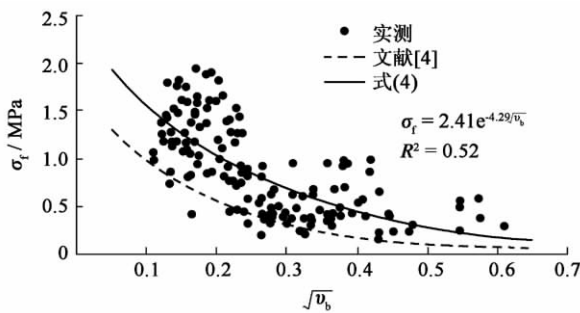


图 4 海冰卤水体积对弯曲强度的影响

Fig. 4 Influence of brine volume on sea ice flexural strength

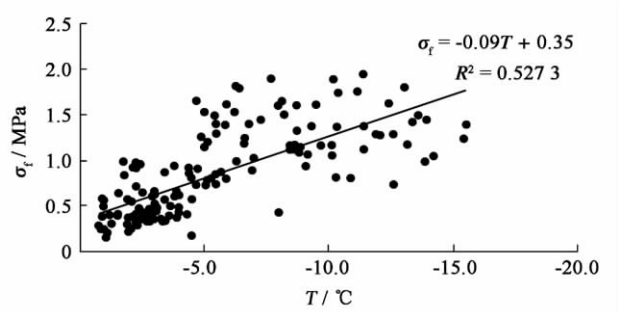


图 5 海冰温度对弯曲强度的影响

Fig. 5 Influence of ice temperature on sea ice flexural strength

3.1.3 加载速率影响

加载速率对海冰弯曲强度影响的研究相对较少。Timco 等^[4]在统计分析了大量试验数据后指出, 受试验数据的限制, 海冰弯曲强度 σ_f 与加载速率 $\dot{\sigma}$ 的关系不显著。虽然如此, 一些研究者的试验结果表明 σ_f 与 $\dot{\sigma}$ 有明显的相关性, 并且海冰弯曲强度在不同加载速率下呈现出一定的韧脆转化关系^[11]。Kermani 等^[15]对淡水冰的试验表明了冰的弯曲强度随加载速率呈线性增长。本文将 155 个试样的弯曲强度与加载速率的关系绘于图 6(a) 中, 并通过线性拟合得

$$\sigma_f = 0.74 + 0.26\dot{\sigma} \quad (6)$$

从图 6(a) 所示的结果可以发现 σ_f 与 $\dot{\sigma}$ 的线性相关性较弱。这主要是由于海冰测试样本源于不同的测

点,海冰的冰晶结构、卤水体积(盐度和温度)有很大的差异,从而导致了海冰弯曲强度的显著离散性。为降低卤水体积的影响,这里将卤水体积的平方根 $\sqrt{v_b}$ 分为0.1~0.2、0.2~0.3和0.3~0.6三部分,再单独分析 $\dot{\sigma}$ 的影响,分别如图6(b)~图6(d)所示。可以发现,在相对接近的卤水体积下, σ_f 与 $\dot{\sigma}$ 有较好的线性关系,这一点在图6(d)中更为明显。由此推断,在相同的卤水体积下,海冰的 σ_f 与 $\dot{\sigma}$ 有良好的线性关系。

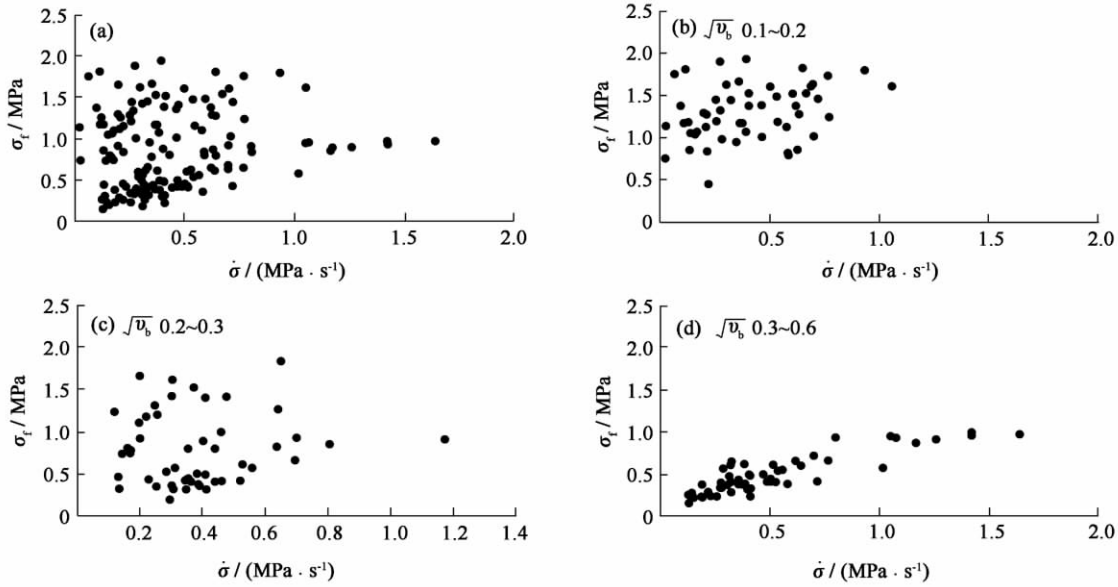


图6 应力速率对海冰弯曲强度的影响

Fig. 6 Influence of stress rate on sea ice flexural strength

3.2 海冰弯曲强度的双因素影响分析

为进一步分析卤水体积平方根 $\sqrt{v_b}$ 和加载速率 $\dot{\sigma}$ 对弯曲强度 σ_f 的耦合影响,依据以上弯曲强度的单因素影响情况, σ_f 与 $\sqrt{v_b}$ (T, S)呈指数关系,同时与 $\dot{\sigma}$ 呈线性关系,并参考式(4)和式(6)的函数关系,可以推测 σ_f 与 $\sqrt{v_b}$ 、 $\dot{\sigma}$ 有如下关系:

$$\sigma_f = (a + b\dot{\sigma}) e^{(c+d\dot{\sigma})\sqrt{v_b}} \quad (7)$$

式中 a 、 b 、 c 和 d 均为待拟合参数。针对式(6)的函数形式,并依据对155个实测弯曲强度的曲面拟合,得到拟合参数 $a=2.58$ 、 $b=0.07$ 、 $c=-5.54$ 和 $d=2.00$ 。一般应力速率 $\dot{\sigma}$ 在0~1.6MPa/s之间,因此 $b\dot{\sigma}$ 在0~0.11之间,其最大值仅为 a 值的4.3%。因此,这里令 $b=0$,对式(7)进一步简化为

$$\sigma_f = 2.61e^{(-5.58+2.09\dot{\sigma})\sqrt{v_b}} \quad (8)$$

式(8)的拟合曲面及等值线如图7(a)~图7(d)所示。图7(b)所示的拟合残值 $R^2=0.59$,要高于单因素分析中 σ_f 对 $\sqrt{v_b}$ 函数拟合时的残值 $R^2=0.52$ (如图4)。由此可见,对海冰弯曲强度的双参数($\sqrt{v_b}$, $\dot{\sigma}$)分析更加合理。

图7(c)和图7(d)分别从不同的角度反映出 σ_f 与 $\sqrt{v_b}$ 、 $\dot{\sigma}$ 的对应关系,更加细致在表现出不同卤水体积和加载速率对海冰弯曲强度的影响。对比分析图7(d)和图4可以得出,海冰的 σ_f 随 $\sqrt{v_b}$ 的增加呈负指数降低。图4中的拟合曲线没有考虑 $\dot{\sigma}$,而图7(d)则更详尽地反应出 σ_f 在与 $\sqrt{v_b}$ 呈负指数关系的同时, $\dot{\sigma}$ 对 σ_f 的影响。

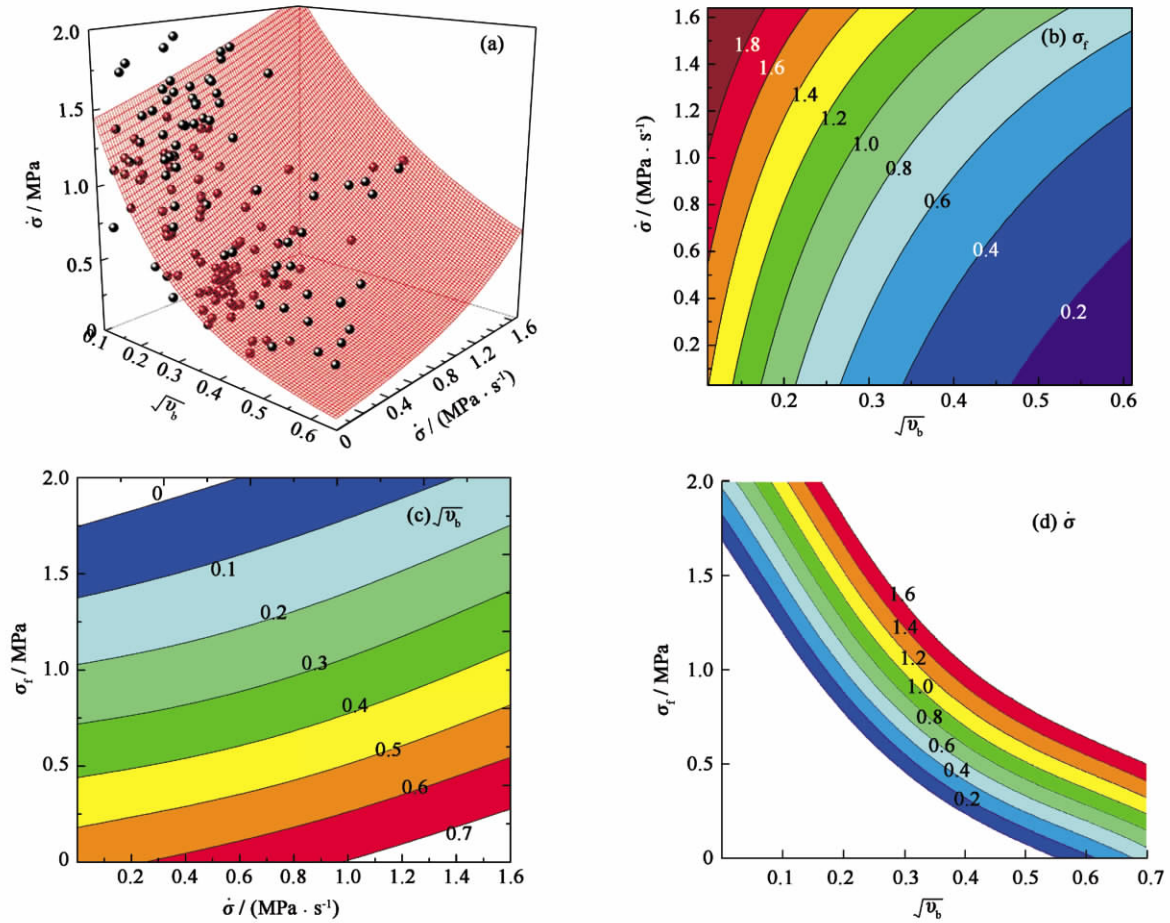


图7 不同卤水体积和加载速率下海冰弯曲强度的拟合曲面及等值线图

Fig. 7 Sea ice flexural strength fitted under various brine volumes and stress rates and its isoline distribution

4 结 论

海冰的物理力学性质是冰区油气开发中海洋结构设计和海冰动力特性分析的重要参数。通过对海冰物理力学性质的研究, 可为合理地确定油气开发区的海冰设计参数提供依据。在 2008 ~ 2010 年度, 对环渤海沿岸海冰的物理力学性质进行了现场及室内测试, 并重点对海冰弯曲强度进行了分析。通过对环渤海 9 个不同测点的测试, 确定了莱州湾、辽东湾西岸和辽东湾东岸 3 个不同海域海冰的弯曲强度特性。通过分析海冰的卤水体积、温度和加载速率等因素对海冰弯曲强度的单因素影响, 确定了海冰弯曲强度与卤水体积的平方根成负指数关系、与加载速率呈线性关系。在此基础上, 对海冰弯曲强度与卤水体积、加载速率进行了双因素分析, 拟合了海冰弯曲强度与卤水体积、加载速率的函数关系, 并对其拟合的合理性进行了讨论, 为推算不同条件下海冰弯曲强度的设计参数提供了参考依据。

致谢: 在渤海海冰现场测试中得到了大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室的毕祥军、许宁、陈金龙、孙强、刁芒的协助; 此外, 郭峰玮、卫志军、车啸飞、肖能也参加了室内测试和数据分析工作, 在此表示感谢。

参考文献:

- [1] TIMCO G W, WEEKS W F. A review of engineering properties of sea ice [J]. Cold Regions Science and Technology, 2010, 60: 107-129.
- [2] MASTERSON D M. State of the art of ice bearing capacity and ice construction [J]. Cold Regions Science and Technology, 2009, 58

- (3): 99-112.
- [3] FREDERKING R M W, TIMCO G W. On measuring flexural properties of ice using cantilever beams [J]. *Annual Glaciology*, 1983, 4: 58-65.
- [4] TIMCO G W, O'Brien S. Flexural strength equation for sea ice [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 1994, 22: 285-298.
- [5] PARSONS B L, LALB M, WILLIAMS F M, et al. The influence of beam size on the flexural strength of sea ice, freshwater ice and iceberg ice [J]. *Philosophical Magazine A*, 1992, 66(6): 1017-1036.
- [6] GAVRILO V P, LEBEDEV G A, FEDOTOV V I, et al. Seasonal variability of physical-mechanical characteristics of sea ice [J]. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 1991, 1(1): 1053-5381.
- [7] KOVACS A. Estimating the full-scale flexural and compressive strength of first-year sea ice [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(C4): 8681-8689.
- [8] BLANCHET D. Mechanical properties of first-year sea ice at Tarsiut Island [J]. *Journal of Cold Region Engineering*, 1997, 11: 59-83.
- [9] BARRETTE P D, PHILLIPS R, CLARK J I, et al. Flexural behavior of model sea ice in a centrifuge [J]. *Journal of Cold Engineering*, 1999, 13(3): 122-138.
- [10] 张明元, 严德成, 孟广琳. 海冰弯曲强度的研究 [J]. *海洋科学*, 1993(5): 59-62. (ZHANG Ming-yuan, YAN De-cheng, MENG Guang-lin. Study on sea ice flexural strength [J]. *Marine Sciences*, 1993(5): 59-62. (in Chinese))
- [11] 隋吉学, 孟广琳, 李志军, 等. 环渤海海冰弯曲强度影响因素分析 [J]. *海洋环境科学*, 1996, 15(1): 73-76. (SUI Ji-xue, MENG Guang-lin, LI Zhi-jun, et al. Analysis of the factors affecting bending strength of the sea ice in Bohai Sea [J]. *Marine Environmental Science*, 1996, 15(1): 73-76. (in Chinese))
- [12] TIMCO G W, FREDERKING R M W. Compressive strength of sea ice sheets [J]. *Cold Region Science and Technology*, 1990, 17: 227-240.
- [13] GAGNON R E, GAMMON P H. Characterization and flexural strength of iceberg and glacier ice [J]. *Journal of Glaciology*, 1995, 41(137): 103-111.
- [14] FRANKENSTEIN G, GARNER R. Equations for determining the brine volume sea ice from -0.5°C to -22.0°C [J]. *Journal of Glaciology*, 1967, 6(48): 943-944.
- [15] KERMANI M, FARZANEH M, GAGNON R. Bending strength and effective modulus of atmospheric ice [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2008, 53: 162-169.

Experimental studies and characteristics analysis of sea ice flexural strength around the Bohai Sea*

JI Shun-ying¹, WANG An-liang¹, SU Jie², YUE Qian-jin¹

(1. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China;
2. Collage of Physical and Environmental Oceanography, Ocean University of China, Qingdao 266003, China)

Abstract: In the oil/gas exploitation of Bohai Sea, the physical and mechanical properties of sea ice are important to determine the design parameters of offshore structures, and also have important influence on the ice dynamics. With the increasing applications of ice-breaking conical structures, the investigation of sea ice flexural strength is more valuable since it is the most important factor to calculate the ice force. In this study, the sea ice flexural strengths were measured in situ and in door around the Bohai Sea at nine sites. Meanwhile the salinity, velocity and loading rate were also measured in the experiments. The characteristics of sea ice flexural strengths were analyzed at the Laizhou Bay, the west shore of Liaodong Bay, and the east shore of Liaodong Bay. Finally, the influences of brine volume (salinity, temperature) and stress rate on the sea ice flexural strength were analyzed. Based on the linear function between flexural strength and stress rate, and the negative exponential function between the flexural strength and the square root of brine volume, a double-parameter equation is established to determine the sea ice flexural strength. This study can be used to determine the ice load on the conical and slope structures in ice-covered regions.

Key words: Bohai Sea; sea ice; flexural strength; experiment measurement

* The study is financially supported by the National Non-Profit Research Program of China (No. 200805009; 201105016).