

冰区海洋石油钢结构 工程力学

——海洋石油钢结构强度与安全可靠性评估

方华灿 编著

北京)

51

5

石油大学出版社

123815
TE951
005

冰区海洋石油钢结构 工程力学

——海洋石油钢结构强度与安...可靠性评估

方华灿 编著



石油0117464

石油大学出版社

内 容 提 要

本书系石油大学海洋石油机械工程研究室多年来围绕渤海冬季结冰期海洋石油钢结构在低温及随机冰载作用下的强度设计及服役期间的安全可靠性能评估课题,开展试验与研究的总结。

本书应用理论力学从海洋石油钢结构承受的外载荷方面,分析了海冰的作用力以及海冰引起的冰激振动及其响应;还应用材料与断裂力学从结构本身的材料方面,介绍了低温与冰载作用下的强度与疲劳试验,研究了海洋结构用钢的疲劳与断裂强度特性;最后,综合载荷与强度两个方面,较系统地介绍了海洋石油钢结构的构件以及结构整体的安全可靠性能评估。

本书可供海冰、海洋、石油、机械工程以及力学方面的科技人员参考,也可以做为有关高等院校的研究生或大学生的教学参考书或教材。

0046/25
21

冰区海洋石油钢结构 工程力学

方华灿 编著

*

石油大学出版社出版

(山东省东营市)

新华书店发行

山东省东营新华印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/16 18.125 印张 460 千字

1996 年 8 月第 1 版 1996 年 9 月第 1 次印刷

印数 1—800 册

ISBN 7-5636-0804-4/TE·157

定价:25.00 元

前 言

海洋石油钢结构如海洋石油钻井、采油平台等系由构件焊接而成,不仅焊缝处有残余应力,缺陷在所难免,而且往往几何形状复杂,应力集中问题严重,海洋石油钢结构在工作期间处于腐蚀介质中,不仅承受着经常的风、波浪、海流等环境载荷的作用,而且在冬季结冰的海域还受到海冰的作用。例如我国渤海在冬季结冰期间,海冰的作用比波浪的作用还要大,而且还曾经有过海上平台被海冰推倒的经验教训。因此,对于渤海石油钢结构不仅在设计时需要考虑低温冰载作用之下的疲劳与断裂强度设计;而且在服役期间还要适时进行安全可靠评估,所有这些问题均需要通过科学研究,进一步解决。

我国渤海石油公司针对海冰问题,开展了多项科研工作,石油大学海洋石油机械工程研究室自1989年以来,先后参加了其中的两项课题的研究工作。一项是:渤海固定平台在低温冰载作用下的强度设计问题的研究;另一项是:海上结构物的裂纹缺陷的安全可靠性评估问题的研究。近六年来,石油大学围绕这两项科研课题,不仅进行了大量海洋用钢的低温下的强度与疲劳试验,而且还做了低温及随机冰载作用下的疲劳裂纹扩展试验;还针对海冰作用下的平台的断裂与疲劳强度设计以及平台服役期间的疲劳与断裂失效的安全可靠性评估,进行了理论与专用计算程序的软件的编制等工作。本书就是为了总结这些科研成果而编写的。

海洋石油钢结构在海洋环境载荷引起的重复应力作用之下,发生的失效叫作疲劳失效;而在极大载荷作用之下,超过材料的断裂韧性所发生的脆断称为断裂失效。疲劳与断裂失效是海洋石油钢结构的主要失效模式。针对这两种失效模式,本书从海上钢结构的强度设计以及服役期间的安全可靠评估这两个目的出发,总结了海洋用钢在低温及冰载作用下断裂与疲劳强度试验的特性;从我国渤海气象、水文及海冰的特点出发,分析了钢结构上作用的海冰力以及海冰引起的冰激振动及其响应。这样,本书既包括了分析海冰引起的外载荷的理论力学;又介绍了研究海冰环境下材料本身强度的特性的材料力学与断裂力学及其应用,故书定名为:《冰区海洋石油钢结构工程力学》。

根据上述目的与要求,本书的内容由七章组成。即:第一章渤海的气象、水文与海冰特点,第二章渤海海冰与结构物的作用力,第三章渤海石油钢结构的冰激振动,第四章渤海石油钢结构低温下的脆性断裂强度,第五章渤海石油钢结构低温下的疲劳强度,第六章海洋石油钢结构构件缺陷的安全性评估,第七章海洋石油钢结构整体的安全可靠评估。全书七章均由方华灿编写。由于目前国内尚缺乏专门介绍海冰力学方面的书籍,本书的写成尚属于初步尝试,还不成熟,故热诚地希望能得到读者的宝贵意见,以便进一步修改、补充和完善。

鉴于本书的内容组成,这本书可供海冰工程、海洋工程、石油工程、机械工程以及力学学科等方面的科学研究、工程技术人员参考,也可做为上述学科、专业的研究生及大学生的教学参考书或教材。

先后参加有关科研工作的教师:陈国明、贾星兰、黄东升、徐兴平等;博士、硕士研究生:段梦兰、沈可斌、盛宝成、王江、许发彦、王维东等,均为本书内容的形成,做出了贡献。渤海石油工程设计公司、渤海石油检测公司、天津大学、清华大学、中科院力学所等单位,均为本书提供了宝贵的数据与资料。石油大学(华东)、石油大学(北京)的有关部门、系、教研室等,也为本书的

出版给予了很大支持与帮助。特别是万邦烈及沈家骏两位教授还在百忙之中,对本书进行了审查。在此,谨向所有上述单位、部门及有关同志,致以诚挚的感谢!

编 者
一九九五年五月

目 录

第一章 渤海的气象水文与海冰特点	(1)
第一节 渤海的气象水文特点.....	(1)
第二节 渤海的海冰冰期与冰情.....	(8)
第三节 渤海的海冰运动特点	(18)
第四节 渤海的海冰物理力学性质	(24)
第二章 渤海海冰与结构物的作用力	(36)
第一节 结构物上冰力的作用形式	(36)
第二节 结构物上冰力的计算	(39)
第三节 渤海石油钢结构的冰力计算	(51)
第三章 渤海石油钢结构的冰激振动	(75)
第一节 概说	(75)
第二节 渤海冰激振动分析的结构模型	(79)
第三节 渤海冰激振动的动力响应	(88)
第四节 渤海冰激振动的响应分析及减振措施	(98)
第四章 渤海石油钢结构低温下的脆性断裂强度	(111)
第一节 海洋用钢的抗脆断性能.....	(111)
第二节 海洋用钢抗脆断性能的工艺因素.....	(127)
第三节 脆性断裂强度的评定.....	(133)
第五章 渤海石油钢结构低温下的疲劳强度	(141)
第一节 海洋用钢低温下的疲劳试验.....	(141)
第二节 海洋用钢低温下的疲劳特性.....	(155)
第三节 渤海固定平台的管节点在冬季的疲劳强度.....	(167)
第六章 海洋石油钢结构构件缺陷的安全性评估	(183)
第一节 总论.....	(183)
第二节 缺陷断裂失效的安全性评估.....	(188)
第三节 缺陷的疲劳失效的安全性评估.....	(207)
第七章 海洋石油钢结构整体的安全可靠性评估	(232)
第一节 概述.....	(232)
第二节 结构整体的安全可靠性评估的基本方法.....	(237)
第三节 海洋石油钢结构整体的疲劳可靠性分析.....	(261)
后记.....	(281)
参考文献.....	(282)

第一章 渤海的气象水文与海冰特点

渤海是一个东北——西南长轴走向的半封闭大陆架海域,整个海域为内陆包围,只有东面经渤海海峡与黄海相接,南北纵长自北纬 37°至 41°,横宽自东经 117.5°至 121°,全部海域包括四个部份,即辽东湾、渤海湾、莱州湾和渤海中央盆地,如图 1-1 所示。渤海与黄海间的渤海海峡通道较窄,外海对其海域的影响较小,渤海的气象水文主要由本海域支配。但由于渤海四个部分的地理位置不同,其各个部分的气象水文及其对海冰的影响,也存在差异。本章拟围绕渤海的气象水文与海冰特点进行介绍。

第一节 渤海的气象水文特点

一、风

渤海位于欧亚大洲的东侧,冬季处于高空东亚大槽的槽后,常受西伯利亚寒流的侵袭和蒙古稳定冷高压的控制。风直接影响冰的消融及运动。

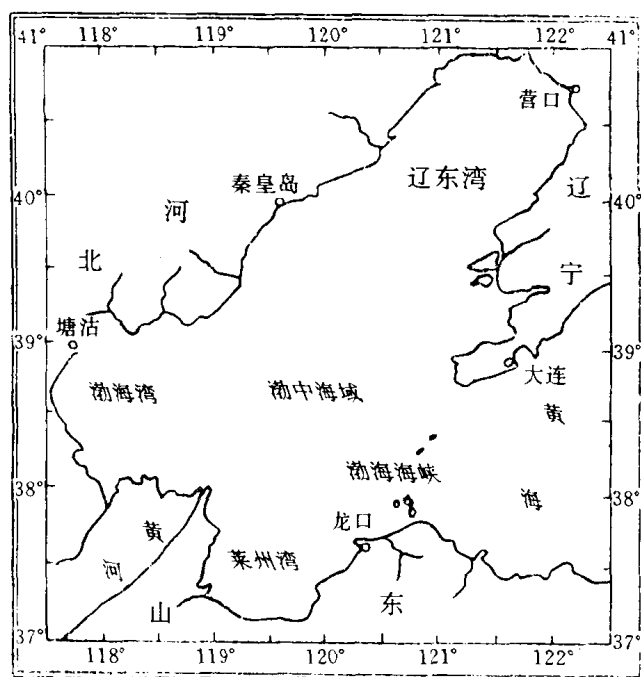


图 1-1 渤海海域图

(一) 渤海的风玫瑰图

渤海海域各个部分的最大风速、月平均最大风速、月平均最小风速以及常风向,如表 1-1 所示。风的风向、风速及出现频率可以风玫瑰图来表示;以渤海湾部分为例,其一年中 12 个月的风玫瑰图如图 1-2 所示。

(二) 风向特点、风对海冰在冬季影响大,从渤海来看,冬季盛行偏北的季风,这是它的风向特点。冬季来自北方的寒潮是渤海海域冬季盛行北风的主要原因。从渤海湾来看,自图 1-2 的 12 月和 2 月的风玫瑰图中,明显看出:偏北向风频率占 60%左右;从辽东湾来看:偏北风的出现频率一般在 26.4%~31.1%之间;从莱州湾来看:冬季北风、西北风和东北风为主,其在 6 级风以上的约占 12.11%。总之,渤海冬季盛行偏北季风

的特点是明显的。

(三) 多年一遇大风风速 多年一遇的大风风速应根据多个观测点多年的测定结果,采用皮尔逊Ⅲ型(P-Ⅲ型)、龚贝尔(Gumbel)以及韦布尔(Weibull)分布的概率分布,进行计算得出。例如莱州湾以马山子气象站的 22 年(1967~1988 年)测风记录为基础,参考海陆风速相关关系,运用上述三种概率分布计算得出的平均结果如表 1-2 示。

表 1-1 渤海海区水文气象数据表

项目 海 区	气 象 数 据							水 文 数 据																				
	面 积 km ²	最大 风 速 (m/s)×(m/s)×(m/s)	月平 均最大 风 速 (m/s)	月平 均最小 风 速 (m/s)	常 风 向	极端最高 气温 ℃	极端最低 气温 ℃	入海 主要 河流	最大 水深 (m)	潮 汐 性 质	最大 平均 潮差 (m)	最大 可能 潮差 (m)	平 均 波 高 (m)	最大 波 高 (m)	最大 波 周期 (s)	最大 流速 (节)	最高 水温 ℃	最低 水温 ℃	最高 盐 度 (g/L)×(g/L)	最低 盐 度 (g/L)	初 冰 日期	结 冰 日期	终 冰 日期	海冰 一般 厚度 (m)	最大 冰 厚 (m)	海冰 一般 堆积 高度 (m)	海冰 最大 堆积 高度 (m)	
渤 海 大 连 市	28000	40	8.8	4.4	N	33.5-12.7			78		4.07	0.6				3.5								0.1				
海 峡 海 洋 岛					NE						7.44	—	13.9			—								—				
辽 营 口		5.1			SW			辽 河		不正	2.7	5.4	0.3			2.1					11	105	3	0.25				
东 湾 葫 芦 岛	28000	40	—	3.5	ENE	34.0-23.6		滦 河	32	规 半 日 潮	2.1	4.6	0.6	10	10	—	32.4	-3.7	34.2	13.3	月 下 旬	—	月 下 旬	—	1	2-3	9	
渤 海 塘 沽 湾	14000	28	6.7	3.7	SW	38.5-18.3		黄 河	28	不正 规 半 日 潮	2.5	5.29	—	10	10.5	1.6	—	33.9	-2.5	32.2	2.36	12	90	3	0.2	0.8	1	4
渤 海 秦 皇 岛 中 部	29800	32			SE			蓟 河		日 潮			0.6			4.5					中 旬	110	下 旬	0.3				
					SW	33.5-12.7			30	正 规	0.8	1.96		10		1.3	—	32.0	-1.6	32.0	13.4							
					NE					日 潮					3.2													
莱 州 湾	11000	40	7.1	3.1	SSE	39.8-21.3		黄 河	18	正 规 半 日 潮	0.9	2.22	0.3	10		1.1	—	32.6	-5.4	32.5	10.9	11	100	3	0.15	0.7	2-4	6
								淮 河		潮			0.6			3.1					月 下 旬	121	下 旬	0.25				

表 1-2 渤海莱州湾多年遇大风风速

时间距 (分钟)	重现期(年) 风速(m/s)	2	5	10	20	50	100
10		22.3	24.8	25.7	26.8	28.0	29.0
2		23.9	26.5	27.5	28.7	30.0	31.0
1		24.3	27.0	28.0	29.2	30.5	31.6
3		26.8	29.8	30.8	32.2	33.6	34.8

按照同样方法,渤海湾根据 6 个观测点的 15 年数据,统计处理,计算得出 50 年一遇的平均结果是:34.6m/s(P-Ⅲ)、38m/s(Gumel)、32.9m/s(Weibull)。

二、气温

气温是表示空气温度的物理量,长时期持续低温是造成海上冰封的主要原因。渤海沿岸冬季最低气温一般为 $-8\sim-15^{\circ}\text{C}$,其中辽东湾的极端最低气温达 -23.6°C ,一般出现在 1 月;莱州湾的极端最低气温为 -18°C ,而渤海湾的最低气温为 -15.4°C ,均出现在 1 月。

气温随时间是变化的,因此应根据一定数量的观测站的数据统计结果,给出统计特征值。今以渤海湾为例,给出气温多年统计特征值的年变化曲线,如图 1-3 所示。图中分别给出了

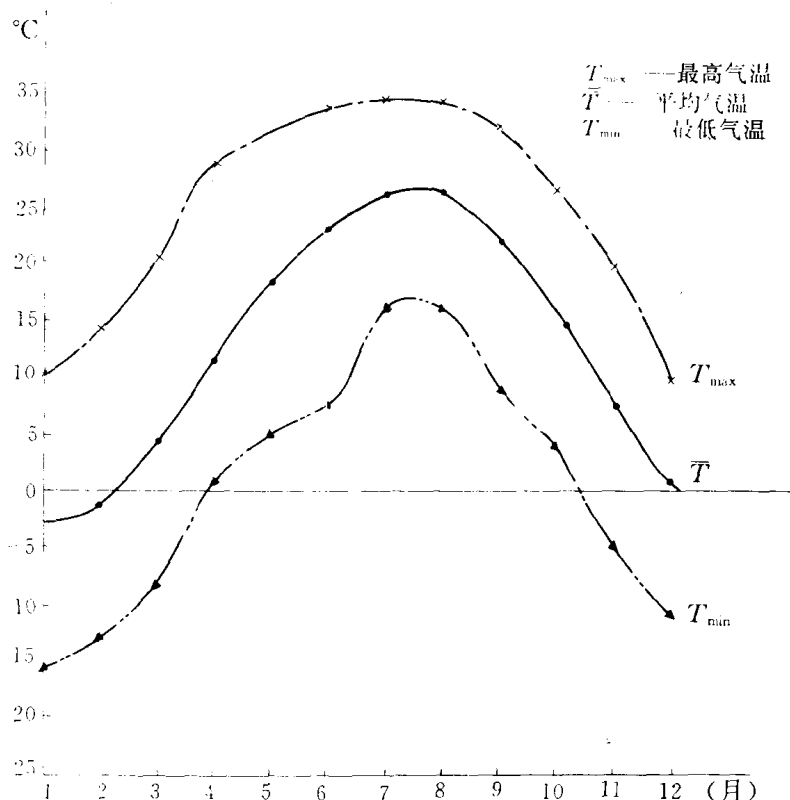


图 1-3 气温多年统计特征值年变化图

最高气温($T_{\max}$)、最低气温($T_{\min}$)及平均气温($\bar{T}$)。图 1-4 给出了 1989、1990、1991 三年在辽东湾测定的气温的月变化图,自 12 月 24 日至 2 月 16 日,曲线自下而上分别依次为 1989、1990、1991 年。自图中显见,1989 年冬季是三年中冷空气活动频繁且风力最强的一年,该年冷空气又多又强。

三、太阳辐射和热辐射

太阳辐射是地球上能量的源泉,也是地球大气和海洋中一切物理过程的基本动力。进入地球大气的太阳辐射,约 43% 被海洋和陆地吸收。这些被吸收的短波辐射,除少量传入深层或存留在表层外,

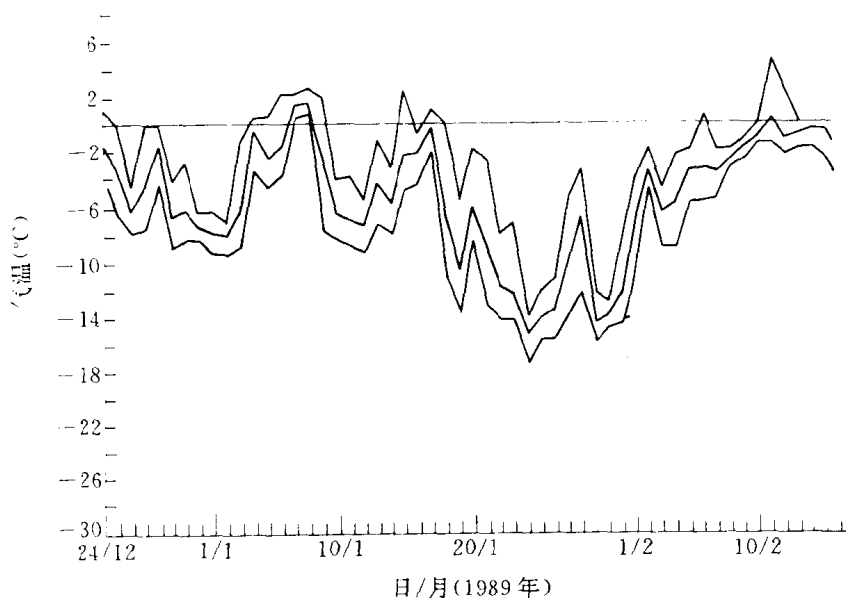


图 1-4 三年测定的气温月变化图

其余均以长波形式向大气和空间辐射,其中大部分被大气吸收,使大气增热。这样,大气除直接吸收太阳短波辐射及吸收地面和海洋的长波辐射之外,它本身也不断发出长波辐射到达地面。大气发出到达地面的长波辐射叫做大气散射辐射。

(一) 太阳辐射

到达地面的太阳辐射是由太阳直接的辐射与大气散射辐射两部分所组成。

随着地球的运动,一年四季、一日之内以及纬度不同地区的太阳辐射,均有明显地周日变化、年变化和年际变化及区域差异,再加上大气和水汽的吸收以及大气和云的反射等作用,就使得到达地面的太阳辐射的变化极为复杂。

(二) 热辐射 这里热辐射是指地球表面吸收的太阳辐射与地球表面支出的总辐射的差值,也就是辐射平衡量。显然,热辐射对海域的水文、气象要素变化,海水与大气之间的热交换以及海冰的消融和运动,均有着直接影响。

表 1-3 给出了渤海石油公司在辽东湾测冰平台上的自动天气站所测得的太阳辐射及热辐射的统计表。从表中可以看出,虽然三个年度在同一个月份内,太阳辐射月总量均不相同,但从 1 月至 3 月各个年度的太阳辐射月总量及平均总量均呈明显增加的趋势。这是由于位于我国北方较高纬度的辽东湾海域,在冬季时太阳相对的位置由南向北移动的原因所致。

表 1-3 太阳辐射及热辐射统计表

月份	年 份	项 目		太阳辐射		热 辐 射	
		月总量(kJ/cm)	平均总量(J/cm·d)	月总量(kJ/cm)	平均总量(J/cm·d)	月总量(kJ/cm)	平均总量(J/cm·d)
十二月	1988 年 12 月 1 日~31 日	23.9	770	3.4	110		
一月	1989 年 1 月 1 日~31 日	26.5	854	9.4	306		
	1990 年 1 月 1 日~31 日	31.3	1011	5.1	164		
	1991 年 1 月 8 日~13 日	24.0	999	1.5	63		
二月	1989 年 2 月 1 日~28 日	36.4	1306	20.4	727		
	1990 年 2 月 1 日~28 日	28.2	1028	14.8	527		
	1991 年 2 月 1 日~28 日	36.0	1287	11.4	406		
三月	1989 年 3 月 1 日~15 日	22.7	1511	27.4	883		
	1990 年 3 月 1 日~16 日	26.1	1633	16.2	1011		
	1991 年 3 月 1 日~30 日	48.1	1552	24.6	795		

四、水温

这里是指海水温度,海水的最低温度直接决定着海水的结冰。因此,在海冰工程中海水温度是水文特征的重要参数之一。

(一) 海水温度降低的影响因素 从渤海的实际情况来看,影响海水温度降低的因素主要有:

1. 外部注入冷水量的大小 沿岸淡水河流注入的冷水或带冰块的冷水量大,则海水温度受影响而降低。以辽东湾为例,每年自11月至次年2月约有几亿 m^3 的远低于海水温度的冷水流入。

2. 海水蒸发水汽量的多少 渤海海域因气温远低于水温,空气中水汽含量小于紧邻水面的水汽含量,故而促进海水蒸发,于是水温降低,再加以冬季大风多,既加速了空气流动,又增加了蒸发水面面积,故而更加速蒸发。

3. 大气与水面热交换程度 渤海因水温高于气温,大气与水面必然要进行热交换,再加以冬季的大风相助,将使热交换加速进行。

4. 风与海流移运冷水情况 风与海流可将沿渤海海岸附近的冷水甚至冰块移运到温度较高的海中,从而降低海中尚未达结冰温度的海水温度。

5. 涨潮与落潮的冷却作用 在渤海沿岸的潮间带,这种冷却海水的作用更加显著。

6. 海域的热容量大小程度 渤海沿岸水浅,热容量少,极易将海水冷却到结冰温度。

7. 太阳日辐射量减小程度 渤海海域在冬季时因太阳移至南回归线附近,日照时间缩短,太阳日辐射量明显减小,影响水温降低。

上述诸因素影响水温的降低,即海水要放出热量;但海水还要从太阳的短波辐射吸收热量,这样对海水来说就有一个热平衡问题,而海水吸收热量与放出热量的平衡,正是决定海水温度的本质所在。

(二) 渤海冬季水温日变化的特点 在一年冬季的几个月中,渤海水温的日变化规律是不相同的。下面分成三个阶段来分析其规律:

1. 降低阶段 渤海一般是发生在11月上旬至次年1月下旬,此时期沿岸水最先冷却,且由于上面分析的几种原因,形成沿岸低水温区和海中高水温区。这样,随着每日的涨潮与退潮,自然出现海中高水温对沿岸低水温的影响两次,即两次高水温值,两次低水温值,明显地表现出渤海水温按照正规半日潮的潮流周期性日变化的规律。

2. 平稳阶段 渤海通常是自1月下旬至2月上旬。这段时间水温的日变化量很小,周期性变化规律消失,水温在一天中基本上保持在结冰温度上下,故称为平稳阶段。形成日水温平稳的原因,主要是海水的平衡。因为这时由于沿岸冷却海水的低温与海中偏高温度的回流海水的温度基本抵消,水温低了放热结冰,水温高了停止结冰,故而海水热量平衡,温度稳定。

3. 回温阶段 这是指渤海自2月中旬至3月下旬阶段。该阶段太阳短波辐射量逐日增大,海水加速融化,水温逐渐升高。但由于海中水温较高的海水向沿岸的流入,故随着每日潮流的涨落,与降温阶段相同,水温日变化又出现了正规半日潮的潮流周期性的变化规律。

这里,以辽东湾为例,给出了表层海水温度的日平均及瞬时值以及日变幅值,如表1-4示。渤海其它海域的最高、最低水温,可自表1-1查出。

表 1-4 表层水温和盐度统计表

项 目	要 素 年 份	水 温(℃)			盐 度(g/L)		
		1988 年冬 (89.1.14 ~3.10)	1989 年冬 (90.1.1 ~3.17)	1990 年冬 (91.1.5 ~2.8)	1988 年冬 (89.1.14 ~3.10)	1989 年冬 (90.1.3 ~3.17)	1990 年冬 (91.1.5 ~2.8)
日平均最高值		0.40	1.30	-0.52	30.92	31.88	31.14
日平均最低值		-1.42	-1.68	-1.60	28.79	31.43	30.87
瞬时最高值		0.90	1.70	0.03	31.37	31.99	31.27
瞬时最低值		-1.47	-1.71	-1.62	28.43	31.15	30.70
最大日变幅		1.35	1.50	1.22	1.35	0.67	0.47
最小日变幅		0.10	0.04	0.04	0.18	0.10	0.10

五、盐度

海水中含盐量的多少叫做盐度,海水盐度的多少直接影响到结冰的温度高低及快慢和海冰强度,因而盐度也是海冰工程中的一个重要参数。我国在渤海海域的实际测量表明:海水盐度与水温一样,同样具有明显的周日变化、逐月变化和年际差异。表 1-4 给出了渤海辽东湾的海水盐度的日平均值、瞬时值及变幅值。渤海其它海域的盐度可见表 1-1。

(一) 海水盐度的周日变化规律 从渤海来看,由于沿岸浅水的盐度低,而海中深水区的盐度高,因而每日随着涨潮与落潮,海水盐度也同样出现偏高与偏低的按潮流周期而变化的规律。但当沿岸大量结冰,使沿岸与海中盐度大体均等,因而每日周期性变化的现象即自然消失。

(二) 海水盐度的逐日变化规律

由于海水的盐度每立升低于 5 克,因而在海水结冰的时候才会使海水盐度升高,这就造成了海水盐度随着逐渐结冰的进程而逐日有所变化的现象。表 1-4 中给出了不同年份在一段时间之内的盐度的平均值及瞬时最高值和日变幅。海水盐度的日变幅是与海水温度变化的三个阶段有关的,渤海海域一般是降温阶段的日变幅较大;而平稳及回温阶段则盐度的日变幅较小。

六、海流

海流是海水的运动形式之一,大量的海水水平地或垂直地从一处向另一处以相对稳定的速度的流动即叫做海流。海流常是由于短期的、偶然的、非周期性的和周期性的多种型式的海水运动复杂地合成在一起而形成的。由于海冰的消长均与海水的运动有关,所以海流也是海冰工程中必不可少的水文基本要素之一。

海流一般分为潮流和余流两类,但就其成因来说,又可划分为:梯度流、风海流、补偿流及潮流四种。潮流是在月球和太阳引潮力作用下海水周期性的水平流动和垂直涨落,垂直方向的涨落称做潮汐,水平方向的流动叫做潮流。从渤海来看,近岸海域以潮流和风海流为主,海流的最大可能流速应为潮流最大可能流速与风海流最大可能流速的矢量和。渤海海域的海流以潮流为主,如遇大风时余流会增大,特别是向岸风时,风海流与潮流叠加会使海流速度明显增大。

潮汐一般常分为:正规半日潮、全日潮和混潮三种。若在每个太阳日内所发生的两次高潮和两次低潮,其相邻高潮和低潮的潮高及涨落潮时均相等,则称此潮汐为正规半日潮,否则为不正规半日潮。渤海海域的潮汐情况有差异,辽东湾海区通过调和与分析,其中 JZ-20 海区属于正规半日潮,而营口、葫芦岛则为不正规半日潮;但莱州湾海区通过在埕岛附近设立的两个水

位观测站较长时间的实测测量,对实测数据进行调和和分析表明该海区为不正规半日潮,而龙口附近却为正规半日潮海区;渤海湾海区根据塘沽长期验潮站和其它 8 个短期验潮站的实测资料及调和和分析证明该海区属于不正规半日潮类型,而且日潮对半日潮的比重从东向西逐渐减小。这些潮汐性质可见表 1-1。

整个渤海海域的海流流速也是存在差异的,其最大流速的不同,可自表 1-1 看出,具体情况如下:

(一) 渤海湾近岸区 海流流速一般小于 1.4 节,最大流速为 2.6 节左右。若遇 50 年一遇的极大风速 33m/s,最大可能的风海流流速不超过 2 节,再与潮流合成后则此海区 50 年一遇的最大可能海流流速不超过 4.6 节。这个海区的海流以潮流为主,余流很小,经实测海流最大流速为 140cm/s,而余流流速一般小于 30cm/s。

(二) 莱州湾近岸区 海流流速一般为 0.8~1.1 节,最大流速为 2.6 节,最大可能流速为 3.9 节。这个海区也是以潮流为主,余流很小,余流流速均小于 10cm/s。经实测在埕岛附近最大流速为 72cm/s。

(三) 辽东湾海区 辽东湾的潮流运动主要受控于万家屯外海((39°52'N,119°57'E) M_2 潮流系统影响,同时也受海湾本身地形影响,故以 M_2 分潮流为主,而 M_2 最大分潮流平均速度为 42cm/s 以上。该海域潮流呈往复运动状态,与海湾走向基本一致。该海区余流速度较小,约为潮流流速的 1/10,平均在 5cm/s 左右,大于 10cm/s 的仅占 4.2%。余流方向集中在 N—E 范围内,且一般以 ENE 和 NE 方向频率最高,两者频率均在 65%以上。但应指出的是这种频率是变化的,例如经渤海实测在 1989 年冬季就出现过 NW 方向余流频率高于 NE 方向的变化。这种频率变化的原因与每年气象条件以及辽东湾沿岸冰和黄海暖流余脉影响强弱等有关。辽东湾通常东侧的海流速度比西侧大,一般东侧的最大可能流速可达 4.2 节,而西侧只有 2.7 节。辽东湾海区越近湾顶的近岸海流速度越大,最大处常可达 5 节多。

七、海浪

波浪是海水中各种波动现象的反映,这里主要指由风产生的海浪。涌浪是当引起风浪的风已经显著减弱、完全停止或改变了方向之后遗留下来的浪;还有当地无风而从邻近海区传来的浪,也叫做涌。

渤海由于三面环陆,海峡口较窄,具有封闭内陆海区的特点,涌浪不易传入,故渤海的波浪以风浪为主,其频率约占 85%以上。以渤海湾海区为例,一年四季涌浪都比较少见,夏、秋、冬三季频率为 4%,而春季只有 2%,且均出现在东南方向。

渤海海域为季风区,冬季多偏北风,夏季多偏南风,因而海浪方向也是随着季节变化,且其分布大小与风向的分布一致(见表 1-1,图 1-2)。以莱州湾为例,波浪有明显的季节性,春季是季风交替季节,浪向紊乱;夏季盛行 SE 风,故海浪相应地以 SE 向为主;秋季由于蒙古高压风速加强,偏北风逐渐增多,故直至冬季海浪均以偏北浪向为主,其中 ENE 向频率最高,NE 向次之。

渤海海域的波高也有其特点,首先波高受风力和水深的影响,随着冬季风力的增大而增高。其次,因渤海地形南部海域开阔,风区长,因而南部产生的浪也较大。这样,就构成了渤海的波高南大北小和冬季较大夏季较小的特点。此外,波高也与风向有关,对于渤海沿岸,当离岸风时则不会兴起大浪,否则若为向岸风,则沿岸即可形成较大的风浪。例如渤海北部大于等于 2m 高的海浪的频率只占 8.2%;而渤海南部海域则频率高达 13.7%。再如渤海西北部因冬季大风多为离岸风,不常掀起大浪,而夏季偏南大风时,波高可达 3m。总之,今以十分之一大波波

高做为波高,而以百分之一大波波高做为最大波高时,则渤海近岸区年平均波高为 0.5m,平均周期为 2.3s;而最大波高为 6.5m,最大周期为 9.2s。对于渤海湾海区则年平均波高为 1.0m,最大波高达 7m,最大周期为 13s。此外,根据 50 年一遇的水位,0.5m 等深线一带的波高值均在 4.7m 以下,平均周期 6.5~7.7s;2m 等深线处 50 年一遇波高不超过 5.6m。再向海中水更深处,则虽浪高增大,但传至近岸区时波已破碎,表 1-1 中给出了渤海海域各个海区的深水处的平均波高及最大波高值。

第二节 渤海的海冰冰期与冰情

一、渤海海冰的生成与类型

渤海是我国纬度最高的海区之一,它在东面开口,北、西、南三面被陆地包围,深入我国大陆,这里周围有许多河流,每年有大量淡水流入,盐度较低。这些特殊的地理环境与相应的气象条件,使渤海具备了结冰的条件。下面拟首先分析海冰的生成过程及海冰的类型。

(一) 渤海海冰的生成 辽东湾北部沿岸的浅滩,位于渤海最北端,纬度高、水浅、热容量小,平坦而宽阔的潮间带有数公里长的涨落潮带,再加上冬季的北风、寒流、降温、大雪以及大量冷河水的注入等因素,就为这个海区在渤海中首先使海水降温达到结冰温度,准备了条件。因此,多方面调查证明:辽东湾北部沿岸 0 至 5m 浅海区是渤海海冰生成的主要海区,整个渤海海域海冰每年都是首先在这里生成。今将其生成的过程简述于后:

1. 海水降温至结冰温度 结冰温度海水与淡水不同,随盐度而异。纯水在 0℃ 结冰,4℃ 时密度最大,但海水中含有大量的溶解盐类,故其结冰温度及最大密度时温度均随含盐量而变化。渤海辽东湾海水的盐度约为 30g/L,因而结冰温度为 -1.6~-1.8℃,最大密度时的温度为 -2~-3℃,所以海水表面结冰时,海水温度垂直分布梯度很小,15m 水深,温度仅相差不超过 1℃。海水结冰首先就要依照前面介绍过的海水温度降低的各项影响因素,创造条件使海水温度降低,达到结冰温度,并使表层结冰海水继续上下对流,进行热交换,以使冰达到最大密度时温度。

2. 海水引晶开始结成冰 引晶即形成结晶核,海水温度降至冰点以下,必须有结晶核存在,海水才能开始结冰。雪花是最好的引晶物,海水中的悬浮微粒也能形成结晶核。冰的开始形成可以自海水的任何一层,因为海水的上下对流,可以将产生结晶所必须的过冷水带至下层,从而使冰晶在结晶核附近形成。而析出的结晶热,又可带至海面,故即可使冰的结晶过程在各层不断继续进行。若开始形成的冰在底部,则由于冰的密度小于水的密度,因而底层或水中形成的冰成长到一定程度,必将浮出水面上,它们与水面上最初出现的彼此冻结的冰针会合,即形成了灰色薄层冰脂,叫做初生冰,继而出现薄冰,如灰冰、灰白冰、白冰等。

3. 构成固体冰晶与空隙 最先在海面上形成的海冰,是由相互交错的细冰针的冰和薄冰片组成,这些冰直接与空气接触,冻结速度较快,即构成固体冰晶及冰晶间的空隙。但这些空隙很快就被新冰填满,使空隙内的盐汁不易流出,而被封闭起来,这就造成了海冰与淡水冰的差别,因为海冰除固体冰晶外还有盐卤汁,而淡水冰则无卤汁。

4. 生成各种各类变形冰 最先在海面上形成的含有卤汁的固体冰晶,进而由于风、浪、海流、河流、地形以及其它外力的作用,即可生成各种各类的变形冰,如堆积冰、重叠冰、冰脊冰、冰丘等。在渤海常是形成特征尺寸可达 10km 的大冰原。

5. 周而复始地重新结冰 海冰生成之后,在风和海流的作用下,可以被推向岸边滩涂,变

成搁浅冰,也可以被运动到海中,还可以在原地继续生长变厚。生成的冰离开之后的海区又可重新结冰。这样,只要水温合适,即可周而复始地不断生成新冰,构成“冰源”。

应该指出的上述的海冰生成过程只能在平静的海面上进行,波浪起伏的无冰水面上不能生成冰。还需指出的是上述海冰生成需要一段相当长时间,正如我国俗语所说:“冰冻三尺,非一日之寒”,这是因为海水要降低水温至结冰温度是需要一段时间的。正因为如此,在海中水温降低更加缓慢,因而如渤海中部就很难在短时间内冻结成较厚的冰,而渤海中部的厚冰往往都是来自于沿岸的。

(二) 渤海海冰的类型

渤海海冰的寿命很短,一般仅 4 个月左右;但在短暂时间内由于海冰受到海流的推拉,大风的拖曳,河水(或潮水)的冲刷,凹凸地形的顶举和沉降等外力的作用,不仅能生成大面积的平整冰,同时还可以生成各类变形冰。渤海海冰按不同分类标准,可划分成如图 1-5 所示类别。今将其中主要的几种,简要说明如下:

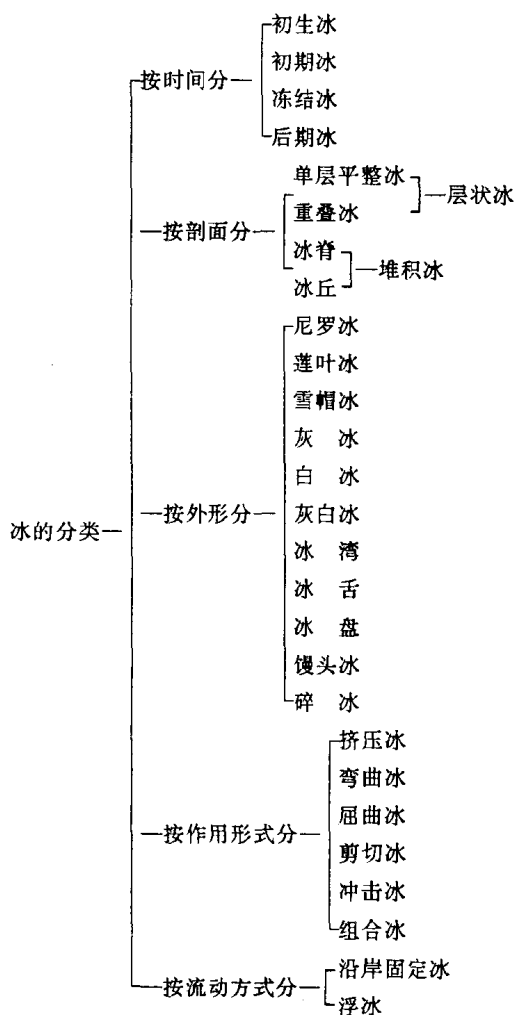


图 1-5 渤海海冰的分类

1. 平整冰 它从冰的剖面来看,是单层平整的层状剖面,故叫做单层平整冰。这种冰在渤海多生长在海湾、港口等海面相对平静的海区,如辽东湾的西部锦州湾等地。经调查表明:渤海最大单层平整冰冰厚 38cm,重冰年更厚一些,但最大也不超过 45cm。渤海的平整冰按照外形来看,常见的有尼罗冰、灰冰、灰白冰,而白冰很少见,除非在沿岸潮间带的静水池中。单层平整

冰冰质均匀而坚硬,其中尼罗冰还富有弹性,是生成其它各类变形冰的最基本的冰,而灰冰和灰白冰则是海冰试验的最佳类型,因其物理力学性质最具代表性。

2. 重叠冰 这种冰的剖面仍是层状,只不过不是单层而是多层,故仍为层状冰。它不仅在渤海是主要类型的海冰,而且是海冰的主要特征之一。重叠冰的生成主要是海流的作用,使平整冰冰面产生屈曲破坏,从而开始重叠,重叠的层数与冰的弯曲强度和挤压力强度有关。从渤海的情况来看,在最大风海流流速 2 节的情况下,给予冰层的推力较小,仅能使尼罗冰产生屈曲破坏,并借助尼罗冰的弹性造成重叠,而灰冰、灰白冰等均达不到屈曲破坏。尼罗冰重叠的层数与其弯曲强度 σ_t (0.7MPa) 及挤压强度 σ_c (1.5MPa) 有关,因为破坏强度 σ 为

$$\sigma = \frac{\sigma_c - \sigma_t}{2} \quad (1-1)$$

故必须海流给予冰层的推力达到冰的破坏强度时,才能驱动冰产生屈曲破坏并沿着冰面上爬,直至爬到一定高度,待弯曲力接近或达到破坏强度 σ 值时,则冰层另改变为其它(如弯曲破坏)破坏形式,而终止重叠。渤海的重叠冰冰厚一般在 15~70cm 之间,多为同一种冰厚重叠而成,其表层约 1/3 厚度冻结密实,而 2/3 的下层层间松散,有些未冻结。重叠冰一般首先从层间破坏,强度约为单层平整冰的 2/3 至 3/4(表层时)。渤海的重叠冰从外形来看,常见的有:尼罗冰与冰脊、冰丘重叠,尼罗冰与粗糙冰重叠,粗糙冰与粗糙冰重叠,重叠冰与重叠冰重叠等,表面重叠高度约 1.2m。

3. 堆积冰 堆积冰的形成机制是由于海洋环境载荷对冰的作用,相互产生挤压力,挤压力使冰层平面内刚度不足的部分首先发生屈曲破坏,进而产生屈曲与弯曲的联合破坏,于是在冰的破坏面上形成堆积。由于堆积成的冰的形状的不同,又可分为冰脊与冰丘。通常将水面或母冰表面以上堆积称做帆高,母冰以下部分称为龙骨,一般龙骨与帆高比的比值为 5~6。渤海的堆积冰,其生成的母冰绝大部分是尼罗冰,但最高的母冰片常是灰冰。堆积冰的长度可以从几十米至数百米,两面的坡度一般小于 45 度,个别情况也有形成 50~80 度的冰壁。重冰年渤海各海区会形成堆积冰。

4. 粗糙冰 粗糙冰是由被破碎的碎冰屑冻结而成的冰。冰受地形、风浪作用而被破碎,但因水温已达结冰温度,故在风、浪停止后,碎冰屑即立刻冻结成表面粗糙的冰。粗糙冰冰层内部含有大小不等的碎冰块及冰屑,甚至还夹杂有雪团及大小冰盘、平整冰板和孤立冰等。粗糙冰随下层上下起伏,做整体运动,自身横向变形小。粗糙冰内部不均匀,刚度也小,无试验价值,只是船易被其夹住,影响航行。

5. 莲叶冰 它是由于尼罗冰被风浪击破之后,破碎冰块之间相互摩擦碰撞,逐渐形成的近似圆形的冰块,而这些冰块的周围边上又有堆起的白色冰屑,看上去很像莲花叶而得名。莲叶冰在渤海一般直径为 30~300cm,莲叶冰经常出现在冰边缘线附近,随风及海流漂移。水温降低时莲叶冰可以与水重新冻结在一起,形成大面积的莲叶冰,其厚度可达 20cm 以上。

二、渤海的海冰厚度

海冰厚度是衡量一个海区的冻结海冰程度的重要物理量之一,也是冰情的一个重要指标。

(一) 海冰冰厚的计算方法

1. 早期计算公式 冰厚 h 按下式计算

$$h = A(\sum T)^B \quad (1-2)$$

式(1-2)中, $\sum T$ 为冻冰日总和; A 及 B 为两个系数,一般可取

$$A = 0.5 \sim 0.7, B = 0.5 \sim 0.6$$

2. 改进计算公式 后来人们对式(1-2)进行了改进,给出了下列公式

$$h = \alpha[(FDD - 3TDD) - K]^{1/2} \quad (1-3)$$

式(1-3)中, FDD 为 -2°C 以下的累计冻冰日; TDD 为 0°C 以上的累计融冰日; α 为冰增长系数; K 为初冰出现时的累计冻冰日的平均值。

3. 热平衡法计算公式 这是 80 年代以来提出的计算方法,它主要是利用海水冻冰时应使海水吸收的热量与冻结时散出的热量平衡的原理。设 Q_{cond} 为冻冰时需放出的热量,则

$$Q_{\text{cond}} = Q_{\text{LWR}} + Q_{\text{SWR}} + Q_{\text{THF}} \quad (1-4)$$

式(1-4)中, Q_{SWR} 及 Q_{LWR} 分别代表短波及长波辐射的热量; Q_{THF} 为扰动热流的热量。这样,根据传热学上计算这些热量的方法,通过解线性代数方程组,即可将隐函数冰厚 h 求出。

由于上述几种计算方法,其中的一些系数如 A 、 B 、 α 、 K 等均需依经验确定,有的如传热学计算公式的系数还需要通过试验测定,因而在海冰工程实际中,一般很少用这些方法进行计算,而是通过实际测量对数据进行统计求得。

(二) 渤海实测各类冰的冰厚

1. 沿岸冰的各类冰冰厚 渤海实测情况如下:

- (1) 单层平整冰 白冰为 30~41cm;
- (2) 变形冰 层状重叠冰为 30~200cm;粗糙冰为 20~180cm;
- (3) 堆积冰 表面高度 3m,隆起高度 1.5m;
- (4) 固定冰边缘线 冰厚 1~3m。

2. 海中冰的各类冰冰厚

- (1) 单层平整冰 莲叶冰 3cm~15cm;尼罗冰 3cm~10cm;灰冰 10cm~15cm;灰白冰 15cm~29cm;
- (2) 变形冰 层状堆积冰 8~137cm,重叠冰 12~90cm;粗糙冰 16~80cm;
- (3) 堆积冰 冰脊高度 5.82m;冰丘高度(表面)1.7m;

(三) 渤海各海区实测冰厚

渤海各海区的实测冰厚的分布状况如图 1-6 所示,图中冰厚数据为海冰一般厚度,而渤海的辽东湾、渤海湾及莱州湾三个海区的最大冰厚数据,可见表 1-1。下面再做些具体说明:

1. 辽东湾 一般年份固定冰宽度为 5km,最大为 10km 以上,平均冰厚 25~50cm,最大冰厚 100cm。在河口浅滩处,平均堆积高达 2~3m,重冰年出现过 9m 的堆积冰。

2. 渤海湾 沿岸固定冰一般年份宽为 0.1~0.5km,冰厚为 10~25cm;北部浅滩和南部河口处,固定冰宽可达 5~10km,冰厚一般为 20~30cm,重冰年达 50~70cm,最大可达 80cm;海冰的堆积高度多为 1~2m,最大可达 3m 左右。

3. 莱州湾 一般年份沿岸固定冰宽多在 0.5km 以内,西部和南岸河口浅滩附近固定冰宽达 2~5km;冰厚一般为 10~25cm,最大可达 40cm;海冰堆积高度多在 1m 以内,河口、浅滩附近的堆积冰高度可达 2~3m,黄河口附近重冰年时最大堆积高度达 8m。

三、渤海的海冰冰期

海冰自生成到融化的时间长短,叫做冰期。一般在整个冰期内分为:初冰期、盛冰期、融冰期三个阶段。海冰冰期的长短与该海区的气象条件和水文条件有关,在同样气象条件下,潮差小、滩涂大、离河口近的海区容易结冰,且冰期长,反之则冰期短。

渤海的实际情况表明:渤海沿岸于 11 月中旬或下旬,由北向南,自沿岸开始逐渐结冰;至次年 2 月上旬或者中旬,由南至北开始融化,逐渐消失。总之,渤海的冰期 1 至 4 个月,各海区