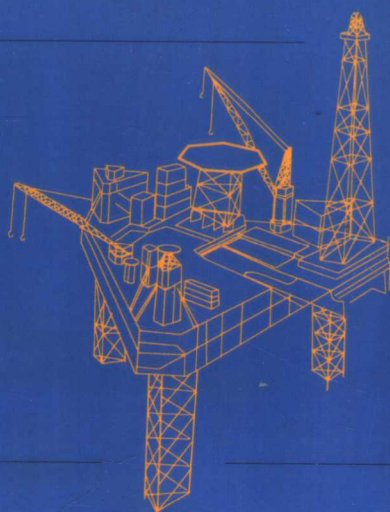




工程海冰学概论

丁德文 等著



海洋出版社

国家科学技术学术著作出版基金
中共大连市委、大连市人民政府

资助出版

工程海冰学概论

丁德文 等著

海洋出版社

1999·北京

内 容 简 介

本书以工程海冰学为轴心,从工程角度的海冰主体出发,首先给出水冻结和纯冰的自然属性,即海冰的形成、物理力学性质、时空分布、冰情预报等,然后由海冰与结构物相互作用出发,导入海冰工程中的人为属性,即海冰设计条件、海冰监测监视技术、海冰灾害及预警、抗冰减灾技术等。本书的内容排序将读者从传统地学概念的冰科学逐步引导到工程学概念的冰科学。依此,本书集中反映出30余年我国海冰研究中以往海冰分布规律的基础研究成果和近几年飞速崛起的工程应用基础研究成果和进展。

本书内容丰富,可供从事寒区科学和技术研究、实践的科研、工程技术人员及有关大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程海冰学概论/丁德文等著. —北京:海洋出版社,
1999.10
ISBN 7-5027-4807-5

I. 工… I. 丁… Ⅱ. 海冰-研究 N.P731.15

中国版本图书馆CIP数据核字(1999)第60478号

责任编辑:赵士青

责任校对:俞丽华

责任印制:严国晋

海洋出版社 出版发行

(北京市海淀区大慧寺路8号 100081)

北京市燕山印刷厂印刷 新华书店北京发行所经销

1999年10月第1版 1999年10月北京第1次印刷

开本:787×1092 1/16 印张:14.75

字数:320千字 印数:0—1000册

定价:45.00元

海洋版图书印、装错误可随时退换

前 言

在海冰科学文献中有“海冰工程学”一词。她同本书倡导的“工程海冰学”在内涵及外延上既有区别，又有联系。简单地讲，工程海冰学的研究内容是海冰区工程的环境和对工程行为的响应。

海冰调查研究是人类生产活动需求的表现。调查研究的速度、成果与生产活动密切相关。新中国成立后至 60 年代末，我国海冰研究集中于冰的消融、分布、形态等方面的调查和个别历史事件的分析。1969 年特大冰封造成渤海海上运输和海上油气勘探的严重损失，促进了渤海海冰调查研究的进一步发展，从海冰监测监视到消融机理和海冰物理力学性质等方面都有长足的发展，并形成一定的规模。80 年代后，蓬勃的渤海海洋开发再次带动了我国海冰研究的高速发展，获得了大量研究成果，成为工程海冰学的基础。

本书分为两部分，第一部分为海冰的自然属性，第二部分为海冰的人为属性。全书总结了国内外大量研究成果，为广大从事寒区科学研究、工程技术人员和有关高等院校师生提供现阶段工程海冰研究的基本状况。

本书由中国工程院院士丁德文研究员倡导和组织完成。绪论由丁德文主笔，李志军参加；第一章和第二章由李志军执笔；第三章由张明元、孟广琳执笔；第四章由孙延维执笔；第五章由余加艾主笔，丁德文、刘钦政参加；第六章由于永海（第一节至第三节）、陈伟斌（第四节）执笔；第七章由孟广琳主笔，李志军参加；第八章由王仁树执笔；第九章由隋吉学执笔；第十章由丁德文主笔，李志军、孙延维参加。

本书是多年调查研究成果的结晶，文中引用了许多曾经和目前正在从事海冰科研工作的科学工作者的成果，这些成果的获取也凝聚着海洋工程界所提出的工程海冰问题。辽河海洋石油勘探开发公司、渤海海洋石油公司、胜利石油勘探局及营口港务局等企业给予本书大力支持。

在本书定稿和出版过程中，海洋出版社赵士青副编审付出辛勤劳动，国家海洋环境预报中心邓树奇研究员协助校阅全文。

国家科学技术学术著作出版基金及中共大连市委、大连市人民政府惠予资助，笔者在此一并致以谢忱。

目 次

绪论.....	(1)
第一章 海冰的形成.....	(8)
第一节 海水的冻结.....	(8)
第二节 海冰的形成与发展	(15)
第三节 海冰晶体结构	(18)
参考文献及资料	(23)
第二章 海冰的物理性质	(25)
第一节 海冰盐度	(25)
第二节 海冰的温度及热学性质	(31)
第三节 海冰的介电、声学性质及应用	(41)
参考文献及资料	(49)
第三章 海冰的力学性质	(51)
第一节 海冰力学研究综述	(51)
第二节 海冰抗压强度	(56)
第三节 海冰侧限抗压强度	(61)
第四节 海冰拉伸强度	(63)
第五节 海冰弯曲强度	(65)
第六节 海冰剪切强度	(69)
第七节 海冰蠕变特性	(72)
第八节 海冰摩擦特性	(78)
参考文献及资料	(83)
第四章 我国海冰时空分布	(84)
第一节 我国冰情概况	(84)
第二节 特殊冰情概况	(88)
参考文献及资料	(90)
第五章 海冰冰情预报	(91)
第一节 海冰厚度的计算公式	(91)

第二节 海冰冻融过程和年度冰期预报	(98)
第三节 利用灰色系统理论进行海冰年际预报	(103)
第四节 海冰数值预报	(107)
参考文献及资料	(116)
第六章 海冰与结构物相互作用	(117)
第一节 海冰与结构物相互作用研究方法	(117)
第二节 海冰对垂直结构物的作用力	(130)
第三节 海冰对倾斜结构物的作用力	(137)
第四节 流冰对导管架结构物作用力的数值模拟	(162)
参考文献及资料	(173)
第七章 海冰的设计条件	(176)
第一节 中国海冰设计区划	(177)
第二节 冰温与盐水体积的设计	(180)
第三节 海冰的设计厚度	(183)
第四节 海冰强度设计条件	(190)
参考文献及资料	(196)
第八章 海冰监测技术	(197)
第一节 海冰监测的传统方法	(198)
第二节 卫星遥感监测技术	(202)
参考文献及资料	(209)
第九章 海冰自然灾害与预警	(210)
第一节 中国海冰灾害的孕育环境分析	(210)
第二节 中国海冰灾害强度频率图	(213)
第三节 中国海冰灾害损失危险图	(217)
第四节 中国海冰灾害影响评价	(220)
第五节 中国海冰灾害对策研究	(221)
参考文献及资料	(223)
第十章 海洋工程的防冰技术	(224)
第一节 海洋工程的防冰措施	(224)
第二节 海洋工程的抗冰措施	(225)
参考文献及资料	(227)

附图 1

附图 2

绪 论

大气圈、水圈、冰冻圈、岩石圈和生物圈是公认的大气候体系的 5 个组成部分。冰的科学广义地称为冰川学 (glaciology), 它把所有天然冰都归入研究的对象 [包括大气冰、海冰、河冰、湖冰、极地冰盖、陆地冰川和地下冰 (冻土)]。然而, 随着科学的进步, 根据研究出发点, 提出多种交叉冰科学, 如冰岩学 (cryology) 就是站在地质学的角度, 将冰作为一种晶体矿物进行研究。我国陆地冰川学属于地理学部分, 湖、河冰放入水文和水利学。近些年, 又将两极冰同气候环境联系起来。海冰是海上一切冰的总称, 虽然包括入海河冰, 但绝大多数是由海水冻结而成并含有卤水胞的冰, 隶属于物理海洋学。

工程海冰学是从工程角度出发, 以海冰为主体, 来研究海冰与工程结构物间的相互作用, 以克服海冰对人类海上活动的威胁, 最大限度地提高冰区海洋开发利用的经济、社会效益。我国的工程海冰学研究站在海洋工程建设的高度看待我国海冰问题, 把地理学中的海冰分布规律、材料学中的海冰物理力学性质同满足人类生产活动的要求紧密地联系在一起。

全球冰的体积为 $2\,000\text{ 万 km}^3$ 多, 约占地表水 (不包括岩石圈内的水) 总体积的 1.7% 。然而, 地表面和大气圈的固态成分中, 分布最广者还是冰。光是冰川覆盖的面积就有 $1\,600\text{ 万 km}^2$ 的陆地表面, 其中包括面积大于欧洲的整个南极大陆。这个数字相当于全球表面的 3.1% 或陆地表面的 10.8% 。以冰胶结物和各种冰体形式含冰的“永久”冻土所占面积也大致相当于这个数字。如果考虑季节积雪和季节冰盖, 就可以认为, 全球陆地表面有 $30\%\sim 50\%$ (一部分是全年或大半年) 被冰占据着。在热带甚至在赤道地区也间或看到低平原上有霜冻、河流短期封冻, 以及下冰雹的现象。极圈以内的整年或几日被冰覆盖的海洋, 也应加到这里来。海冰分布面积为 $3\,770\text{ 万 km}^2$, 为地球表面的 7.3% , 或全球洋面的 11.8% 。若把冰山所分布的地区算进去, 则包括流冰在内的面积为 $7\,260\text{ 万 km}^2$, 为地球表面的 14.2% , 全球洋面的 22.9% 。最后, 大气圈某一高度上总是含有悬浮的冰粒。

这么说来, 地球上到处有冰, 如果地球的最表面上没有, 至少上面的空气中有。冰构成了地球的一个外壳, 谓之冰冻圈。它处于上平流层和电离层高温带与地壳高温带之间。实际上, 只有在对流层才有相当数量的冰晶。对流层的上界位于海拔 $8\sim 17\text{ km}$ 的高度。由此看来, 冰圈的总厚度达 10 km 左右, 但其大部分为分散于大气中的细冰粒带。

依据冰的上述特点, 存在于冰圈内的普通冰有如下形式:

- (1) 分散于大气圈和水圈中的矿物形式;
- (2) 作为地壳冻结层内多矿物岩石中一种成分的矿物形式;
- (3) 某一大量堆聚形式——地表面上的、地壳内或水圈中的单矿物冰岩。

近年来, 随着全球变化成为国际研究的热点, 冰冻圈与全球变化的研究也越来越引起人们的重视。冰冻圈作为古气候、古环境变化的重要信息库, 作为气候变化的灵敏指示器, 冰

冻圈对气候变化的响应和反馈及其变化对环境的影响等的研究,均取得了长足的进展。研究已从静态到动态,从宏观到细观、微观,从现象到本质,从物理过程拓展到化学、生物过程。这些都成为当今南北两极研究工作的重点。

我国的内海——渤海和濒临的黄河的北部处于中纬度地带。由于受冬季西伯利亚南下冷空气的直接影响,出现海冰,也成为北半球海洋结冰的南边界。受特定地理环境作用,这些海冰一直被视为渤海油气开发的潜在灾害。渤海和黄海北部海冰的存在是寒冷气候的产物,但它生长期短,厚度薄,给人类科学研究提供不了类似南极冰盖的场地,除去特定的生态环境条件外,就是海冰影响渤海海洋开发活动。所以,从认识世界到改造世界,又孕育着新的交叉科学。在丁德文院士倡导下,在工程海冰之外,渤海海冰生态环境的研究工作也迈出了可喜的第一步。

海冰主要由纯冰晶、卤水、固体盐和空气组成。其成分比率随外界条件(温度、荷载)、时间和空间等发生变化。其中最重要的控制因子是温度,所以从材料学角度也把海冰称为温度敏感性复合材料。

海冰中的纯冰成分与冻结速率的快慢、冰晶类型和温度等有关。一般来讲,海水冻结速率快,冰的粒径就小;反之,冰的粒径就大。对同一晶体类型的冰,粒径越大,冰粒间的比表面积越小,纯冰占的体积就越大。对不同晶体类型的冰,冰粒比表面积小,则纯冰体积大。温度对纯冰体积的影响表现为:一是温度变化造成纯冰晶的体积变化,二是冰温降低使冰中部分卤水冻结析冰或温度升高使纯冰晶体边缘融化溶入卤水中。

海冰中的盐分主要存在于纯冰晶体间的盐胞、卤水通道或固体盐。固体盐随冰温降低,按一定成分顺序析出。然而,当温度高于 -4°C 时,一般均认为无固体盐存在。卤水中盐分的多少与冻结时海水的盐度有关。这个值只能是冰盐度的初始值,其原因是卤水随冰层内不同层次以及冰龄发生变化,此外还与外载有关。如无加载条件,冰中卤水体积是冰盐度和温度的函数。

冰内气泡含量既与结冰时初始气泡包裹量有关,还与非封闭卤水排泄遗留的气泡有关。对海冰物理力学性质来说,卤水及气泡含量的变化的影响远较纯冰结构自身变化的影响要大。海冰的温度直接影响卤水的盐分浓度,因此海冰温度成为海冰诸多性质的控制因素。用于表征海冰性质变化的物理指标是海冰孔隙率。它是冰温度、盐度和密度的函数。研究海冰诸多性质,测量冰温度、密度、盐度和晶体结构是最基本项目。

海冰物理性质是冰、气候、冰与人类活动诸方面研究领域的基础。小野延雄通过一个四面体形象地把冰热学、冰力学和人类活动共同作为四面体顶点。把四面体从顶点打开就形成一个由四个小三角形组成的大三角形,如图1所示。虽然该图中有许多项目没有编入,但它简明地表达了错综复杂的冰研究领域及研究对象相互之间的对应关系,同时也反映出海冰的物理性质是支承海冰其他学科的基础。

受温度、盐度和密度控制的孔隙率直接决定着海冰相成分的比例,进而影响海冰的导热性能和海冰力学性质。在海冰生消过程中,卤水相变调控着冰内的吸热和发热过程,影响着冰内、冰层底部固体相的增加和减少,表现出卤水“热库”效应,而冰层底部固体相代表着海冰厚度。这种效应对冰期短、厚度薄、温度高的渤海工程海冰行为而言,有着举足轻重的作用。海冰力学性质的变化更直接反映到海冰的工程行为。

根据对渤海和黄海北部30余年来相继开展的海冰环境、海冰灾害及工程海冰的调查研究

工作的技术手段、现有成果和状态,结合我国 21 世纪海洋开发利用的宏伟蓝图,中国工程院丁德文院士采取经济建设优先、重点突破海冰研究领域的策略,提出工程海冰新观点。它集中海冰工程学的核心部分,能够满足目前蓬勃发展的环渤海海洋工程活动的要求,将引导我国海冰界和渤海、黄海北部海洋产业部门围绕经济建设这个中心,开展有针对性的海冰调查研究工作,把海冰调查研究工作转移到为海洋经济开发和建设服务的宗旨上来。

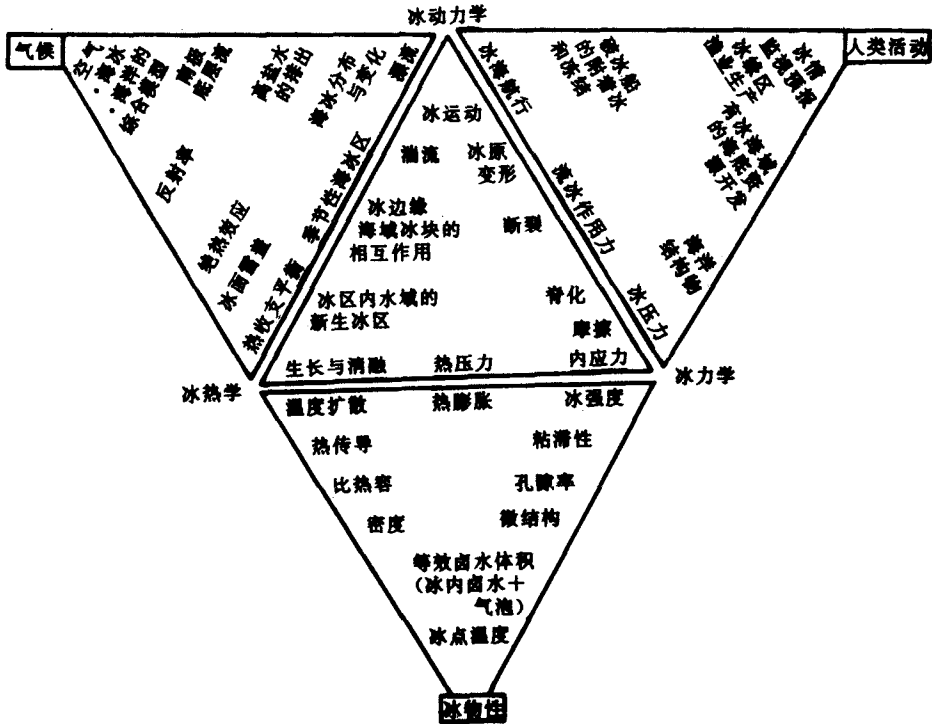


图 1 海冰研究领域关系图

一、工程海冰的内涵

渤海海冰主要是影响海上结构物(船舶)的安全和操作。随着海上工程活动的规模化发展,海冰与结构物相互作用的问题日益突出,解决冰区结构物的合理设计和安全运行愈来愈引起工程界和科技界的重视。长期以来,我国科技工作者利用理论分析、模拟计算、模拟试验、原位观测等全方位研究手段,开展了深入系统的研究工作。但从资料管理和综合再应用上讲,还有较大的差距,不能满足海冰工程学的要求,有待于进一步的提高。例如,单一的冰情、冰况和物理力学性质指标是无法圆满解决冰与结构物相互作用,单一的海冰生消发展预报无法阐明结冰期和融冰期一系列冰性质以及冰工程性质变化。仅仅这一点就直接影响海上作业的撤离和进入时间,进而影响海上生产的经济效益。配合环渤海海洋开发,亟待把各海冰调查全面而分散的资料统一管理起来,经过再分析、处理和加工,为环渤海海洋产业用户提供所需的环境评价、设计参数、实时冰情、预警标准和合理的冰管理服务,达到防冰减灾的目的。反过来,海洋产业部门向海冰调查研究体系提出更科学更严谨的要求,使得未来

海冰调查研究工作向系统化和规范化发展,从而把整个海冰调查研究及后期服务引导到集海冰调查研究、设计参数、预警预报,以及经济效益评估为一体的工程海冰上。

工程海冰属于海冰学科的一个分支,研究内容是海冰学和工程学的交叉部分。按工程方面的要求,它侧重于与海洋结构物工程设计、施工、使用、防冰减灾措施、海冰管理等方面密切相关的那部分海冰科学。因此,工程海冰的研究内容寓于海冰科学之中。显然,工程海冰科学的对象就是海冰工程环境。它以海冰自然环境为基础,着眼于解决工程中的海冰问题,以克服海冰给人类带来的灾害,使海洋工程结构物的设计既安全可靠,又经济合理。按照这一观点,工程海冰的学科体系应包括:海冰生消规律、海冰冰情时空特征、海冰成分结构、物理力学性质、工程海冰设计条件、冰破坏机制和作用荷载及特殊工程海冰问题等。

我国海冰和海冰工程都距形成独立学科还有一定距离。工程海冰无疑是将人类认识自然的海冰科学知识同人类改造自然的海冰工程科学紧密地结合起来。工程海冰作为海冰工程的环境,将海冰视为人类生活和生产活动为系统的环境,包括海冰自然环境、工程技术(生物)环境和社会(经济)环境。

二、产生工程海冰的社会和科学背景

工程海冰产生是一定社会和科学的产物。21世纪海洋世界和渤海油气资源的开发孕育它适实地诞生并将带动它成长。归结起来它的社会和科学背景有以下几个主要方面。

1. 人类活动需求的推动力

任何自然科学研究的生命力均归结于人类活动的需要。渤海海冰研究是海洋开发推动的产物,它研究的问题来自于人类活动,研究结果最终要服务于工程活动。我国工程海冰的提出也摆脱不了人类活动的需要。海洋是人类的第二生存空间。随着经济的迅猛发展和人口的快速增长以及陆地资源的日趋枯竭,人类的生存和发展越来越多地依赖海洋。21世纪将是人类全面认识、开发利用和保护海洋的新世纪。海洋产业将成为人类社会三大支柱产业之一,它为实现国民经济稳定、持续、快速发展的长远利益起到积极作用。

目前,渤海和黄海北部浅水养殖和渔业生产迅速发展。沿岸有许多优良港口,交通运输,尤其是煤炭、石油的海上运输极其繁忙。渤海湾、辽东湾和莱州湾已经探明和开发出多个浅海大油田,渤海沿岸还分布着辽河、大港和胜利油田,这标志着渤海资源开发和利用已达到了一个崭新的阶段。环渤海经济开发圈的战略规划已经形成,渤海开发将带动21世纪海洋资源开发利用的迅速扩展。

渤海沿岸有5个重点港口,平均500 km一个,是全国港口间距最短的地区,并有宜建和已建港口90多处,港口吞吐量占全国主要海港的45%以上。这些港口在过去均有过因冰区操作失误造成的损失,而其他小型港口(渔港)基本冬季不作业。目前受海冰影响最大的是辽东湾海上油气的勘探开发活动,由此带动的冰区海上运输也在酝酿之中。

2. 海冰监测监视立体网

从60年代至今,国家海洋局北海分局所属台站一直进行海冰常规观测,近期增加了沿岸踏勘,扩大了观测视野;中国人民解放军海军配合国家海洋局、渤海石油公司或独立进行海

上破冰船调查;辽东湾东岸鲅鱼圈雷达站自1982年建成以来,通过不断改善观测方法和技术,目前每年冬季向有关部门传送雷达数值化冰情实况资料。雷达观测海冰不仅为港口建设和海冰漂流规律预报提供有关资料,而且近几年还应渤海石油公司、胜利油田和辽河油田等生产单位的要求,在渤海海洋结构物上监测监视结构物附近流冰动态。国家海洋预报中心接收卫星遥感图像并进行分析研究,此外会同国家海洋技术中心主持航空调查,探索渤海海冰遥感技术手段和结果应用。渤海石油公司、辽河油田、胜利油田和科研单位积极配合,利用海上结构物和破冰船进行冰情调查和冰力测量。为了经济简捷以及微观分析,天津大学在80年代后期建成二座冰池实验室,利用物理模拟手段,研究了冰对单桩、平台和斜面结构物的相互作用并对经验冰力计算公式进行了验证。此外,近几年来,在环渤海大规模油气开发的需求下,我国海冰研究工作者与德国、芬兰等国家合作对辽东湾海冰与结构物的相互作用进行研究并与我国冰与结构物相互作用的研究成果进行了对比和验证。

利用这些资料,北海分局及其各中心站、国家海洋环境预报中心、国家海洋环境监测中心进行冰情分析,确定冰情等级和冰情预报。除国家海洋局所属的研究机构从事有针对性的海上、沿岸冰情调查外,中国人民解放军海军,国家教委、中国气象局、中国科学院、中国地震局等所属单位也开展了有关基础研究。近年来,各研究机构会同海洋产业部门,针对工程应用,扩大海冰调查研究领域。

至此,一支以国家海洋局为主体,会同国家教委、海洋产业部门的海冰调查、研究、预报、管理等专业队伍逐步形成。

3. 海冰管理纳入政府公益服务

在渤海结冰之前,每年10~11月间由国家海洋环境预报中心召集全国冰情协商会。在会上,各机构交换不同技术方法预报本冬季冰情并确定冰情等级,上报政府有关部门并公布。在冬季,每旬对海冰的卫星遥感分析图像和预报结果纳入中央电视台广播网。预报结果另外在《中国海洋报》公布。在冬季之后,配合《海洋灾害公报》工作,坚持环渤海海冰灾害的访问工作,了解海冰对海洋产业部门冬季生产和作业的影响、影响程度等,为制定防冰减灾措施提供依据。

为保障海洋活动的安全运行和应急处理,冬季渤海海冰管理被提到议事日程。另外,从1970年2月起先后建造了三艘破冰船。这些破冰船在渤海海冰的海上冰情调查中和海上应急抢险中发挥了积极的作用。随着海上油气开发和冰区港口的新建和扩建,产业部门对破冰能力的要求也不断增加。针对渤海海冰冰期短的特点,渤海石油公司拥有两条破冰型三用船。营口鲅鱼圈新港拥有一艘具有多用途的破冰拖轮,这些多用途船也担任执行冬季海上给养和破冰导航任务。

三、工程海冰的贡献

随着渤海海洋工程活动尤其是海上油气的开发的快速发展,海冰成为困惑当今海洋工程界和海洋界首要因素。由于我国海冰科学和海冰工程科学不能担负目前海洋工程活动要求,而工程海冰能够为目前的渤海海洋积极开发和运输活动提供海冰背景条件,因此它成为海洋工程活动和海洋开发的必然产物,从而将产生巨大的经济和社会效益。此外,工程海冰的提出,

不仅对海冰研究的未来方向起引导作用,满足渤海海洋开发的急需,更重要的是对未来形成我国渤海海冰科学体系有直接的贡献,这体现在以下两点。

1. 完善渤海海冰科学

我国海冰的调查研究工作是从60年代起步的。在之以前,日本帝国主义者为了掠夺我国的财富,曾对渤海海冰进行调查,旧中国只有一点零星的海冰资料。80年代,海上运输和油气开发带动了渤海海冰的调查研究工作。目前,从调查手段、调查内容、监测监视手段和内容、预报方法和内容、冰区工程规划、设计和管理等都有丰硕的成果。调查研究领域基本上包括了整个海冰科学,但与其他高纬度的国家相比,我国的海冰研究还没有形成一门独立的科学,距形成一个完整体系还有一定的距离。由于渤海海冰是北半球结冰的南边缘,加之渤海的特定海洋环境,冰期短、厚度薄、温度高、流动快是其他海域海冰科学不能完全替代的。根据我国海冰研究的现状和未来的发展趋势,一门集国际海冰科学基础和渤海海冰特征的中国海冰科学在近期必将形成,但其等待补充的大部分内容正是工程海冰所要解决的。

2. 促进渤海海冰工程的发展

从内涵上讲,工程海冰是海冰工程中的海冰条件部分,这部分在冰区结构物的规划、设计和营运管理方面起着关键作用。海冰工程中的结构物尺度、外形和特征都是随着海冰条件调整到安全和经济营运条件下的。海冰工程问题和海冰灾害是随海上工程活动的频率而增加的,只有在积累大量的工程经验和事件之后予以归纳和总结。工程海冰率先完善,必定带动海冰工程迅速发展,成为完整体系。

工程海冰具有历史性,它最终要归结到具有我国特色的渤海海冰和渤海海冰工程科学之中,工程海冰生命结束的那天就是渤海海冰和渤海海冰工程完善的那天。

四、工程海冰的未来发展方向

工程海冰作为海冰科学和海冰工程的桥梁,在目前蓬勃发展的渤海海洋开发中要起到积极的作用。根据工程海冰的宗旨,工程海冰成为一个完整的体系势在必行。从工程海冰的现状和对海洋工程的作用,还有以下主要方面需要充实提高。

1. 工程海冰分类

和其他自然科学一样,渤海海冰作为自然界存在的一种现象,从地理学角度上看有它自己的一套定义、名称和分布等级。由于渤海海冰属于季节性寒冻产物,所以它具有活动边缘线和非稳定的时空特征。在大量调查和观测基础上,国家海洋局依据渤海海冰的年际厚度和分布范围建立了地理学冰情等级划分。这些分类在描述渤海结冰程度上是合理的,但在讨论工程海冰条件时有不方便之处。原因来自目的不同。工程海冰的基本因子是海冰的物理力学性质以及影响因素。对于冰区结构物,设计的三个关键因子是冰期、冰厚和单轴压缩强度;对于冰区结构物,运营的海冰管理因子除冰期外,还要求实时和预报冰厚、范围、漂流方向、速度和各种冰的力学性质。

2. 渤海工程海冰设计条件区划

在工程海冰分类的基础上,依据冰区结构物设计是以历史资料为背景,结合历史资料的大量统计和依据海冰外部气温、水温和冰厚评价冰层水平单轴压缩强度的模型,用工程海冰分类等级做出渤海平面分布图。

3. 冰区结构物运营中海冰管理的预警系统

冰区结构物运营中的海冰管理和冰区结构物设计不同之处,是管理中必须以海冰实况条件为前提,以海冰冰情预报为基础。根据各种结构物的抗冰能力做出各种结构物的警报,由结构物业主采取相应保护措施。海冰管理中的海冰条件归属工程海冰范畴。由于预警系统要包含渤海活动的所有结构物,结构物与海冰的相互作用力也必须体现在系统中,形成一个软件包。只有尽快总结以往工作,完善工程海冰体系,才能在近期配合海上工程活动的结构物形成完整的预警体系,降低海冰灾害的可能性。

4. 完善结构物抗冰减灾管理方案和应急措施

虽然抗冰减灾结构物及其在冰区的管理方案和应急措施属海冰工程范畴,但它们都与工程海冰分不开。在以上工作基础上向海洋结构物业主建议结构物抗冰减灾管理方案和应急措施是近一个时期解决的重点问题之一。

第一章 海冰的形成

第一节 海水的冻结

一、Ih 型冰

1. 水的固相态

水比任何其他材料都更能形成多种固相态。如果液态水在常压下冻结或水蒸气在 $0 \sim -80^\circ\text{C}$ 间沉降的话, 会有规则地重复排列, 形成一种六方对称的晶体。该晶体被定义为冰的六方晶系, Ih 型冰或单晶冰。在 $-80 \sim -130^\circ\text{C}$ 间沉降到板上的水蒸气, 也产生一种晶体, 但

其结构为立方体, 故被称为立方晶系或 Ii 型冰。此外, 已确定了至少八种高压水成晶体, 即 II 到 IX 型冰。它们被定义为冰的高压多晶型物质 (图 1.1)。在低于 -140°C , 水蒸气在板上沉降就表现为非晶体冰或者由很小晶体组成的冰。它常被定义为玻璃质或非结晶型冰 (Hobbs, 1974)。

在所有水的固态相中, 只有六方晶系冰在地球上以天然形式存在。海冰由六方晶系冰构成, 但由于复杂的形成过程而具有不同于理论上六方晶系冰的性质。然而, 首先假设它具有六方晶系冰的性质。

2. Ih 型冰的结构

冰结构中的氧原子是 X 线的主要衍射中心。由于冰属于首先被确定了结构的物质之一, 所以氧原子的几何排列很清楚。图 1.2 给出这些研究成果。每一氧原子都位于以四个其他

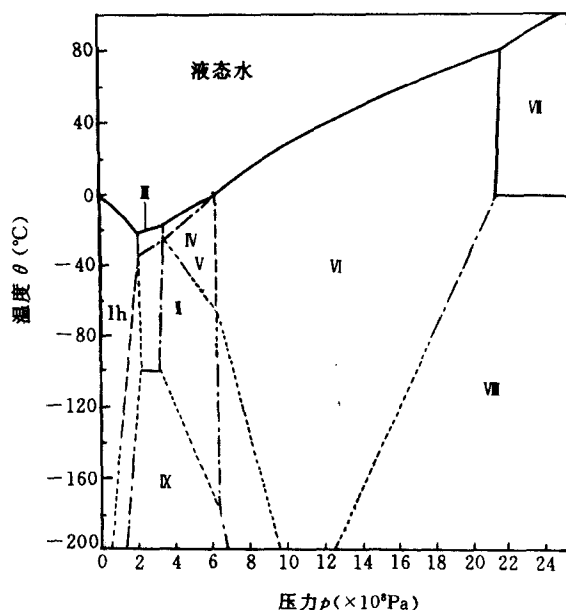


图 1.1 水固态相相图

——测量的稳定线; - - - - -测量的准稳定线;
- · - · - , 外推或估计的稳定线; ······外推或估计的准稳定线。
没有标 Ic 型冰和玻璃质冰

氧原子为顶点构成的四面体中心上。在 0°C , $\text{O}-\text{O}$ 距离是 0.276 nm , 造成一种松散的低密度结构。氧原子的四面体坐标导致冰具有六角对称的晶体结构。这种结构影响多数冰的大比例特征。Ih 型冰结构的一重要特征是把氧原子集中到一系列基面上。垂直于这些面的方向定义为主六方轴, 或 C 轴, 或光轴 (Weeks, Ackley, 1982)。

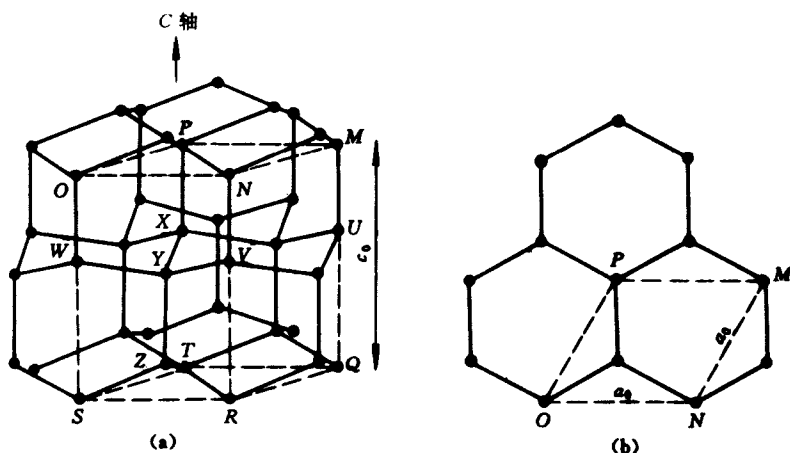


图 1.2 Ih 型冰中氧原子排列

(a) 垂直 C 轴剖视; (b) 沿 C 轴剖视

冰晶结构的基本组构如图 1.2 中字母所示和图 1.3(a)中分开绘制的氧原子集合体。这组原子定义的空间区称作一单元核。在三维空间独立单元核以面对面最佳排列方式构成完整的晶体结构。在该单元核中，总氧原子数是 4。

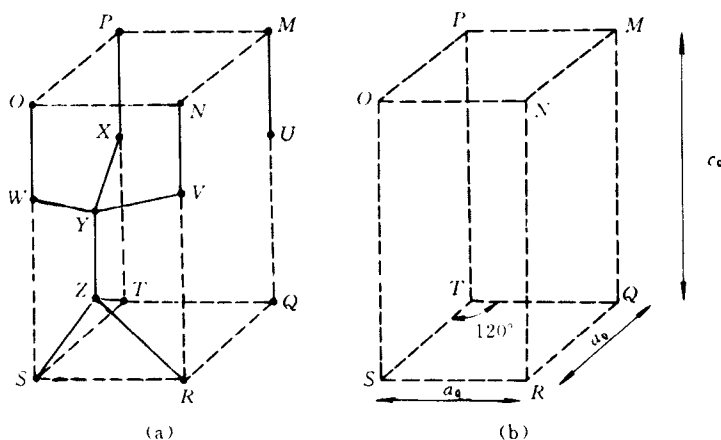


图 1.3 Ih 冰

(a) 单元核; (b) 立方空间格子

图 1.3(b)中字母 M 、 N 、 O 、 P 、 Q 、 R 、 S 、 T 称为 Ih 型冰的空间晶体格子。图上的八个顶点称作晶格点。这些点有一个重要特征，即从任一顶点看晶体结构的剖视图，都是独立的。由于冰的空间格子仅在它的角上有晶格点，所以它是一立方空间格子，或简单空间格子。由图 1.2 和图 1.3(b)所示长度 a_0 和 c_0 表示单元核或立方空间晶格的尺寸。假设最佳四面体坐标是相邻分子间等距离，从几何学角度讲，可以表明 c_0/a_0 之比应等于 1.633 (Hobbs, 1974)。

从原理上讲，X 线粉末衍射计的高分辨能力比较准确和精确地确定 Ih 型冰晶格，不幸的是，实测这些基本值仍然有很大差异，如表 1.1 所示 (Kuks, Lehmann, 1986)。

很久以来，一直不清楚氧原子之间氢原子的位置。然而，根据冰和液态水的红外谱基本上与水蒸气的红外谱相同的事实提出了水分子结构在三种相态中均相同。由此 Bernal 和 Fowler (1933) 提出冰中氢原子位于联结一对氧原子的线上，但距一氧原子约为 10^{-10}m ，而距另一氧原子约 $1.76 \times 10^{-10}\text{m}$ 。在完整晶格中的这种安排是每一氧原子有两个距它 10^{-10}m 的氢原子。图 1.4 表示与每一氧原子相联的四个键上氢原子的六种可能排列 (Hobbs, 1974)。

表 1.1 正常 Ih 型冰晶格常数

$\theta(\text{K})$	$a(\times 10^{-10}\text{m})$	$c(\times 10^{-10}\text{m})$
60	4.4940	7.318
123	4.4962	7.330
223	4.5098	7.347

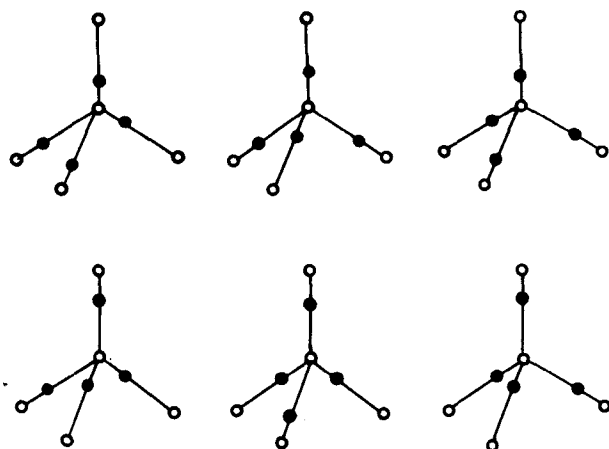


图 1.4 冰中氢原子在绕每一氧原子四个键上的六种可能排列

○—氧原子，●—氢原子

根据 Bernal 和 Fowler 的研究，Pauling 提出一系列控制氢原子位置的规则，即冰规则或 Bernal-Fowler 规则 (Kuks, Lehmann, 1986)。它们是：

(1) 固态冰的水分子类似气态中的水分子。

(2) 每个水分子都定向，因此它的两个氢原子约朝向四个氧原子中形成氢键的两个氧原子。这四个氧原子围成一个四面体。

(3) 每一对相邻氧原子间只有一个氢原子。

(4) 在常规条件下，非邻近分子的相互作用不能明显地保证某一种结构型稳定，以便符合前面提到的条件。

违背任何 Bernal-Fowler 规则都被认为在结构上产生缺陷。如违背规则 (1)，产生离子缺陷：即三个质子围绕一个氧原子产生一个正离子 (H_3O^+)，而一个质子围绕着一个氧原子产生一个负离子 (OH^-)。当违背规则 (2) 时，产生一种 Bjerrun 缺陷。当在一个键上出现两个质子时，产生所谓的 D 缺陷；在一个键上没有质子时，就出现 L 缺陷。

3. Ih 型冰的氢键

凡是由位于负电性原子之间的氢原子结合构成分子的材料，都称作氢结合材料。最完美的氢结合材料可能是水的固态结晶。它的氢原子位于一对氧原子之间 (Hobbs, 1974)。

Ih 型冰的氢键显然不是真正的直线。然而没有直接测量这些角度的试验方法，因此不得不从原子内部距离导出，从而造成相应的误差积累。图 1.5 给出外部、内部分子距离和角度的最佳估算 (Kuks, Lehmann, 1986)。

在天然状态中，由氢键构成的力基本上是静电的。使用图 1.6 所示点电荷模型能得到冰中分子结合和四面体排列的简单解释。

在图 1.6 中，二价键轨道的质心位于 B 和 B' ，而轨道的质心位于 L 和 L' 。与这个水分子有联系的两个质子沿键轨道轴分布，距氧核子 $1.011 \times 10^{-10}\text{m}$ 。两个质子与氧核子的结合力

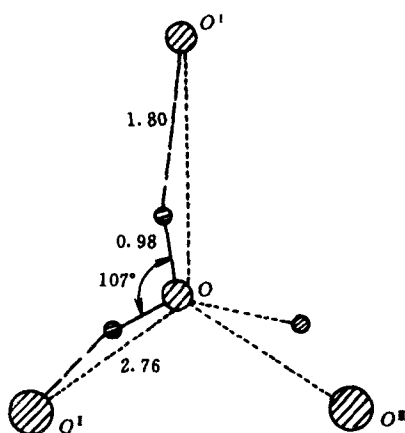


图 1.5 Ih 型冰一氧四面体中原子排列示意图

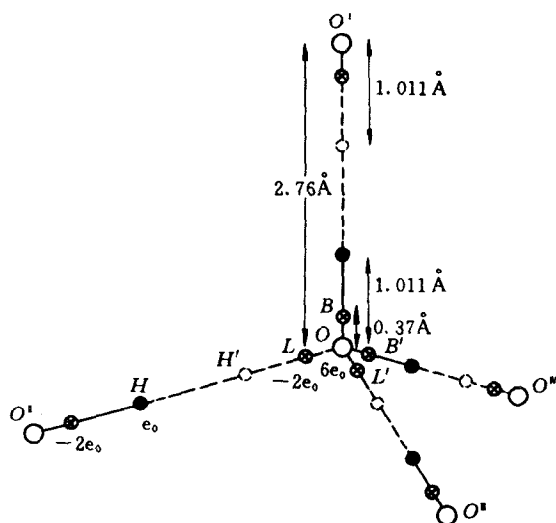


图 1.6 Ih 型冰简化点电荷模型

图中 $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$, 故相应的 $1.011 \text{ \AA} = 1.011 \times 10^{-10} \text{ m}$,

$2.76 \text{ \AA} = 2.76 \times 10^{-10} \text{ m}$; $0.37 \text{ \AA} = 0.37 \times 10^{-10} \text{ m}$.

可以认为由正电荷质子与 B 和 B' 上介电子间的静电吸引力引起。现在考虑在 O 上带有氧核子的水分子。 L 上的单对电子对 O'' 上相邻分子的质子有一吸引力, 因此该分子自身定向, 让其一个质子 H , 位于 OLO'' 线上。同样, 在 O''' 上的分子, 其一个质子位于 $OL'O'''$ 线上, 并且两个与 O 联合的质子位于相邻 O' 和 O'' 分子的单对轨道轴上。由于 L 和 L' 上的点电荷, B 和 B' 形成一近似四面体体系, 因此围绕 O 必须有四个分子。 L 上单对电子对 H 上质子的吸引力形成 O 和 O'' 上分子间的氢键结合。该吸引力把 $O-H$ 距离从气相的 $0.96 \times 10^{-10} \text{ m}$ 增加到冰晶格中的 $1.011 \times 10^{-10} \text{ m}$ 。在介电子和单对电子吸引力的影响下, 一个质子可能占据 H 和 H' 两个位置中潜力最小的一个 (Hobbs, 1974)。

4. 冰晶体原子结构中的杂质

在平衡条件下冰结构中肯定会有很少量杂质。对多数目的, 这个量显然少得足以把冰视为纯净相。当具有合适尺寸的外界原子进入主结构时, 最易形成的固体脱节趋向产生类似的化学键, 并且有适量电荷来保持静电中性。因为氟和氮的离子、原子半径与氧的相近, F^- , HF , NH_4^+ 和 NH_3 都像是取代冰结构中某些水分子的候选物。其他可能物质是 NH_4OH , NH_4F 和氢卤酸 (HCl , HBr 和 HI)。然而, 在海冰中很少有上述物质 (Weeks, Ackley, 1982)。

5. 冰原子结构中的缺陷

与其他结晶材料一样, 冰的诸多力学性质受线缺陷和位错的控制。最低能量最佳位错是位错要有最小的 Burgers 矢量。冰的最小 Burgers 矢量是 $\frac{a_0}{3} [11\bar{2}0]$, $\frac{a_0}{3} [2\bar{1}10]$ 和 $\frac{a_0}{3} [1\bar{2}10]$ 。它们位于三条 a 轴。上述三个矢量的任何两个都能在交叉点上结合, 形成第三个矢量, 其方式如下: