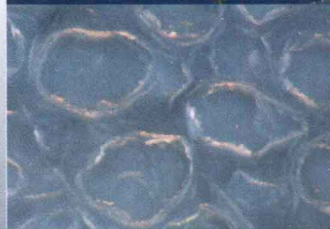


工程海冰 数值模型及应用

季顺迎 岳前进 著



科学出版社

工程海冰数值模型及应用

季顺迎 岳前进 著

科学出版社

北、京

内 容 简 介

本书全面论述了国内外在海冰数值模型方面的研究成果,并重点对海冰现场监测技术、海冰热力学、海冰动力学、海冰本构模型、海冰数值方法、不同尺度下的海冰离散单元模型,以及海冰数值模型的工程应用进行了全面的论述。本书既介绍海冰数值模型方面的理论研究,又对其在冰区油气作业区中的工程应用进行阐述,将理论与工程实践密切结合,对解决冰区海冰数值预报和海洋结构物风险分析提供有益的指导。本书研究成果为作者及合作伙伴十多年的研究成果,得到国家自然科学基金、863 项目、新世纪优秀人才资助计划和国家海洋公益性专项等多个项目的资助,反映了海冰数值模型及工程应用的最新研究进展。

作为我国首部工程海冰数值模型方面的著作,本书可供海洋工程、海洋物理、寒区环境、数值方法等领域的科研人员,以及高等院校相关专业的研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程海冰数值模型及应用/季顺迎,岳前进著. —北京:科学出版社,2011
ISBN 978-7-03-032022-3

I. ①工… II. ①季… ②岳… III. ①海冰-数值模拟-研究
IV. ①P731.15

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 162176 号

责任编辑:沈 建 / 责任校对:李 影

责任印制:赵 博 / 封面设计:耕者设计工作室

科 学 出 版 社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 8 月第 一 版 开本:B5 (720×1000)

2011 年 8 月第一次印刷 印张:23

印数:1—1 500 字数:447 000

定价:90.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

致 谢

本书研究内容得到以下项目资助：

- **国家自然科学基金重点项目**
河冰和海冰生消、危害及其防护问题研究 (59739170)
- **中海油能源发展股份有限公司北京分公司资助项目**
辽东湾海冰现场监测、实时评估与安全预警(1995—2011)
- **国家自然科学基金青年项目**
中小尺度海冰动力学本构模型和数值方法研究 (40206004)
- **国家高技术研究发展计划(863 计划)**
新型平台抗冰振技术 (2003AA602150)
- **国家自然科学基金青年项目**
渤海重叠冰问题研究(40506009)
- **国家海洋公益性行业科研项目**
工程海冰预报技术研究 (200805009)
- **教育部新世纪人才资助项目**
离散介质的基本力学行为及其工程应用 (2009-7)
- **大连理工大学理科基础科研专题**
海冰动力-热力过程的离散单元模型 (DUT10LK09)
- **美国船级社 (ABS) 资助项目**
海冰与海洋结构物相互作用的离散单元模型 (2010—2011)
- **国家海洋公益性行业重大科研项目**
渤海海冰立体监测及高精度预警报技术研究示范 (201105016)

前 言

地球上约 10% 的海洋被海冰覆盖,且这些海冰大多在纬度 60° 以上。然而,在 Baltic 海、Sahalin 海、Hokksic 海以及我国的渤海等低纬度海域,季节性海冰给海上作业、航运和渔业生产带来很大的危害,并由此带来一系列的工程问题。特别在我国渤海的油气开发中,为保障冰期油气生产作业的安全运行,对海冰物理力学性质、冰荷载、冰激结构振动及减振措施、海冰设计参数、海冰现场监测、海冰数值模拟和预报等进行了全面的研究。

张方俭于 1986 年著有《我国的海冰》,较早地对我国海冰特征进行了系统地论述。近 10 年来,海冰研究的工程应用背景随着油气开发的迅速发展而不断强化和明确。丁德文在国家海洋环境监测中心对海冰研究的基础上于 1999 年著有《工程海冰学概论》,明确地提出了海冰的工程应用特性;随后,杨国金根据近 20 年渤海油气开发中开展的海冰问题研究,于 2000 年著有《海冰工程学》,从与海冰相关的工程应用角度进行了较系统地阐述;方华灿和陈国明于 2000 年著有《冰区海上结构物的可靠性分析》,也对海冰载荷及其概率分布进行了较为详细地阐述。考虑以上著作对海冰的物理力学性质、冰荷载、海冰监测技术、冰区溢油等方面的研究进行了较为系统的论述,本书主要针对冰区油气开发中海冰数值模拟和预报的研究工作,重点对海冰的热力学和动力学、海冰动力学的本构模型和数值方法以及在冰区油气作业中的工程应用进行阐述。

近 10 年来,大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室及工程力学系的毕祥军、于晓、张希、屈衍、刘圆、张大勇、张力、郭峰玮、王瑞学、王刚、许宁、王延林、王安良、孙珊珊等研究生开展了大量的海冰现场监测和试验工作,取得了宝贵的第一手资料。为此,作者深深感谢每位团队成员对工程海冰数值模型及应用研究所做出的贡献。本书研究内容得到中海石油有限公司天津分公司及其 JZ20-2 和 JZ9-3 油气田工作人员的大力支持,获得了大量的海冰现场资料,在此表示感谢。

在工程海冰数值模型研究中,得到美国 Clarkson 大学 Hung Tao Shen 教授和 Hayley H Shen 教授的指导,书中的部分内容也是作者与两位教授合作研究的成果。此外,本书研究工作还得到大连理工大学程耿东院士、吕和祥教授、李洪升教授、李志军教授和李锋副教授、国家海洋环境预报中心吴辉碇研究员、刘钦政研究员和李宝辉副研究员、国家海洋环境监测中心王仁树研究员等专家学者的帮助和鼓励,在此一并致以诚挚的感谢。

本书围绕海冰数值模型及其工程应用问题撰写,共 9 章,各章内容及相关撰写人员如下:

第 1 章 绪论 (岳前进,季顺迎)

第 2 章 基于油气海洋平台的海冰现场监测 (季顺迎,毕祥军)

第 3 章 海冰的热力学特性 (季顺迎,岳前进)

第 4 章 海冰的动力学特性 (刘 煜,季顺迎)

第 5 章 海冰与波浪的相互作用 (李春花,王瑞学)

第 6 章 海冰动力学的本构模型 (李 海,季顺迎)

第 7 章 海冰动力-热力过程的数值方法 (苏 洁,季顺迎)

第 8 章 海冰动力过程的离散单元模型 (季顺迎,王安良)

第 9 章 海冰数值模型的工程应用 (岳前进,季顺迎)

本书内容主要是大连理工大学以及相关科研院所 10 多年来在渤海,特别是辽东湾油气区的海冰管理研究工作中不断开展和积累的,同时也引用了国内外相关研究成果。

由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,敬请各位专家学者批评指正。

作 者

2011 年 4 月于大连

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 海冰研究概述	1
1.1.1 海冰数值模型研究	1
1.1.2 海冰与大气、海洋的相互作用	5
1.1.3 海冰的动力破坏	5
1.2 渤海海冰研究概述	7
1.2.1 渤海海冰的冰情特点	8
1.2.2 海冰监测和调查	9
1.2.3 海冰物理力学性质	11
1.2.4 海冰数值模拟和预测	12
1.3 海冰数值模型研究的工程需求	13
1.3.1 海冰灾害预防	13
1.3.2 海冰设计参数确定	15
1.4 小结	17
参考文献	17
第 2 章 基于油气海洋平台的海冰现场监测	22
2.1 海冰定点现场监测系统概况	22
2.2 海冰参数现场监测的数字图像处理系统	26
2.2.1 海冰数字图像监测技术	26
2.2.2 海冰数字图像监测的程序系统	30
2.2.3 海冰数字图像监测技术在渤海油气作业区的应用	33
2.3 海冰的雷达监测技术	35
2.3.1 航海雷达探测海冰的性能指标	35
2.3.2 海冰类型识别	38
2.3.3 海冰漂移轨迹的跟踪	40
2.4 小结	41
参考文献	42
第 3 章 海冰的热力学特性	44
3.1 海冰的热力过程及数值方程	44

3.1.1	长波辐射	45
3.1.2	冰面感热和潜热	45
3.1.3	冰内热传导	45
3.2	冰面太阳辐射的特性分析	46
3.2.1	冰面太阳辐射计算	46
3.2.2	太阳辐射对海冰生消趋势的影响	49
3.3	海洋热通量及冰水间热传递系数	51
3.3.1	海洋热通量的确定方法	51
3.3.2	辽东湾海洋热通量的确定	52
3.3.3	海冰水间的热传递系数	54
3.4	海冰热力过程的计算分析	57
3.4.1	海冰表面温度的确定	57
3.4.2	冰内温度场的计算	57
3.4.3	冰厚的计算	59
3.4.4	渤海海冰的热力特性分析	59
3.5	渤海海冰的特征冰厚	63
3.5.1	特征冰厚的物理机制	63
3.5.2	特定气象和水文条件下的特征冰厚	63
3.5.3	不同气象和水文条件下的特征冰厚	66
3.5.4	渤海冰厚随其特征冰厚的动态变化	67
3.6	冰厚计算的累积负气温法	68
3.6.1	累积负气温方法的物理机理	68
3.6.2	累积负气温法在渤海的应用	69
3.7	小结	71
	参考文献	71
第4章	海冰的动力学特性	73
4.1	海冰的动力方程	73
4.1.1	海冰漂移的动量方程	73
4.1.2	海冰动力要素对比分析	74
4.2	海冰的拖曳系数	76
4.2.1	海冰拖曳系数的确定方法	76
4.2.2	辽东湾 JZ20-2 海域海冰拖曳系数的动量法确定	79
4.3	海冰在风、流和潮汐作用下的动力破坏	81
4.3.1	风和流作用下海冰爬升断裂模式	81
4.3.2	涨落潮时海冰断裂模式	82

4.4 海冰的重叠特性.....	85
4.4.1 一维重叠冰的力学模型	86
4.4.2 二维指状重叠冰的力学模型	88
4.5 海冰的堆积特性.....	91
4.5.1 冰脊几何尺寸特征	92
4.5.2 冰脊帆高的力学模型	94
4.5.3 冰脊的力学性质	97
4.6 小结	100
参考文献.....	100
第5章 海冰与波浪的相互作用.....	103
5.1 波浪在冰区中的传播	103
5.1.1 波浪在冰区的传播特性	104
5.1.2 波浪在冰区传播的黏弹性模型	106
5.2 近岸海冰在波浪作用下的断裂	110
5.2.1 无限长冰层覆盖水域的波动	111
5.2.2 波能通量法	112
5.2.3 波浪进入冰层覆盖水域后的波高变化	114
5.2.4 冰盖的断裂	114
5.2.5 计算结果	114
5.3 浮冰在波浪作用下的断裂	117
5.3.1 基本理论	117
5.3.2 辐射势及绕射势的有限元解法	122
5.3.3 冰块内部应力及断裂条件	124
5.3.4 计算结果及分析	125
5.4 小结	126
参考文献.....	127
第6章 海冰动力学的本构模型.....	129
6.1 弹塑性及各向异性海冰动力学本构模型	130
6.1.1 海冰动力学的弹塑性本构模型	130
6.1.2 海冰各向异性弹塑性本构模型	131
6.1.3 海冰各向异性损伤模型	133
6.2 黏塑性本构模型及其改进	134
6.2.1 黏塑性本构模型	135
6.2.2 黏塑性屈服函数的改进	138
6.2.3 海冰压力项的改进	139

6.2.4	海冰碰撞流变学中的黏塑性模型	140
6.2.5	基于 Hibler 黏塑性模型的弹-黏塑性模型	141
6.3	中小尺度的黏-弹-塑性本构模型	143
6.3.1	基于 Mohr-Coloumb 准则的 VEP 本构模型	143
6.3.2	海冰 VEP 本构模型中的 Drucker-Prager 屈服准则	149
6.3.3	海冰 VEP 本构模型中的粘结力	151
6.3.4	规则区域内海冰堆积过程的数值试验	154
6.4	小结	161
	参考文献	161
第 7 章	海冰动力-热力过程的数值方法	165
7.1	海冰动力-热力过程的有限差分法	166
7.1.1	海冰动力-热力过程的基本方程	166
7.1.2	海冰动力-热力过程的有限差分方法及其改进	167
7.1.3	渤海海冰动力-热力过程的有限差分方法及其改进	169
7.1.4	渤海海冰动力-热力过程的 FDM 数值计算	175
7.1.5	渤海整个冰期的海冰-海洋耦合数值模拟	182
7.2	海冰动力-热力过程的光滑质点流体动力学方法	187
7.2.1	SPH 方法的基本原理及相关参数	188
7.2.2	海冰动量方程的 SPH 形式	192
7.2.3	海冰厚度和密集度的计算	194
7.2.4	局域性海冰漂移的 SPH 数值模拟	194
7.2.5	辽东湾海冰动力过程的 SPH 数值模拟	199
7.2.6	辽东湾海冰热力-动力过程的 SPH 数值模拟	204
7.3	海冰动力-热力过程的质点-网格法及其改进	210
7.3.1	海冰质点在网格内的初始分布	211
7.3.2	拉格朗日坐标系下海冰质点输运	212
7.3.3	网格内海冰厚度的重新分配	214
7.3.4	PIC 方法的改进	216
7.3.5	规则区域内海冰堆积过程的数值试验	217
7.3.6	改进的 PIC 方法在渤海海冰动力学模拟中的应用	220
7.4	海冰动力学的混合拉格朗日-欧拉法	226
7.4.1	HLE 方法的基本方程	227
7.4.2	涡旋风场下海冰的动力学数值试验	229
7.4.3	渤海海冰动力学数值模拟	231
7.5	小结	234

参考文献	235
第8章 海冰动力过程的离散单元模型	237
8.1 不同尺度下的海冰离散分布特性及尺度效应	238
8.1.1 不同尺度下海冰的离散分布特性	238
8.1.2 海冰的尺度效应	250
8.2 海冰动力过程的离散元数值模拟	252
8.2.1 海冰的颗粒离散元模型	253
8.2.2 海冰动力过程的离散元数值计算	257
8.3 海冰重叠和堆积过程的离散单元数值模拟	263
8.3.1 海冰的块体离散单元模型	263
8.3.2 海冰重叠和堆积过程的离散元模拟	266
8.3.3 大中尺度下海冰动力过程的离散元模拟	268
8.4 海冰与波浪相互作用的离散单元模型	270
8.4.1 海冰的三维圆盘离散单元模型	271
8.4.2 海冰与波浪相互作用的离散单元数值计算	274
8.5 海冰对海洋结构作用力的离散单元模型	277
8.5.1 具有粘接和破碎效应的海冰离散元模型	278
8.5.2 海冰单轴压缩强度和弯曲强度的数值计算	281
8.5.3 海冰与直立结构和锥体结构的离散单元模拟	288
8.6 小结	295
参考文献	297
第9章 海冰数值模型的工程应用	303
9.1 渤海潮流场数值计算	303
9.1.1 渤海潮流潮汐的浅水方程及差分格式的建立	304
9.1.2 初始和边界条件及计算稳定性	307
9.1.3 渤海潮流场计算输入条件	309
9.1.4 渤海潮流场计算	310
9.2 基于海冰数值模拟的海冰设计参数	313
9.2.1 渤海海冰设计参数的区划研究	313
9.2.2 基于局地海冰现场监测和数值模拟的海冰设计参数	316
9.3 基于海冰预测的冰害风险评估	321
9.3.1 海冰管理系统概况	321
9.3.2 基于局地海冰数值预报的海冰管理	323
9.3.3 基于现场监测的平台系统安全性能分析	325
9.3.4 冰害预防标准及防冰措施	329

9.4 锥体海洋平台结构的冰振响应分析	330
9.4.1 锥体结构的冰力计算	331
9.4.2 冰激海洋平台结构振动的有限元模型	333
9.4.3 平台结构的简化动力计算	337
9.4.4 锥体平台结构冰振响应的统计分析	339
9.4.5 海洋平台冰激响应分析的验证	341
9.5 工程海冰数值模拟和预测程序系统	343
9.5.1 工程海冰数值模拟和预测系统	343
9.5.2 工程海冰数值预测的应用	346
9.6 小结	354
参考文献	354

第 1 章 绪 论

近年来,随着全球气候的急剧变化,海洋灾害的频繁发生,海洋资源开发向寒区的不断延伸,海冰这一自然现象引起了人们更加广泛的关注,并逐渐发展成为一门新的学科——海冰工程学^[1,2]。建立准确可靠的数学模型,是对危险冰情进行精确模拟和预测,有效地减少和预防海冰灾害的有效方法。针对渤海的冰情特点,我国发展了系统的现场监测手段,并对渤海海冰的物理和力学性质以及数值模拟和预测等进行了系统的研究。渤海海冰数值模型研究紧密结合工程实际,为油气开发区的结构可靠性设计提供海冰推算参数,也为冰期油气生产作业提供安全保障信息。

1.1 海冰研究概述

全球气候变化是当今社会的一个热点问题。海冰作为影响全球气候变化的一个重要因素,受到了气候学家的广泛关注^[3,4]。在海冰对全球气候影响的研究方面,建立了一些适用于气候研究的海冰数值模式,包括海冰动力模式、热力模式以及动力-热力耦合模式,发展了海冰-海洋、海冰-大气以及海-冰-气等多系统耦合的气候模式。

极区海冰数值模拟及相关问题研究从 20 世纪 60 年代开始,于 70 年代末发展成熟,主要包括:海冰生消漂移的数学模型及其计算方法、海冰本构方程、海冰与大气、海洋的相互作用、海冰的动力破坏等。然而,随着寒区生产活动以及资源开发的日益增多,人们转而更多地关注海冰数值模式在海冰工程中的应用,并针对局地海域的海冰特点和工程需求完善海冰数值模式。这不仅提高了所研究海域的海冰数值计算和预报精度,同时也促进了海冰数值模式在计算方法和本构模型方面的发展,并为低纬度冰区的海冰研究积累了经验。

1.1.1 海冰数值模型研究

1. 海冰数值模拟的计算方法

从 20 世纪 70 年代以来,人们分别在欧拉坐标下、拉格朗日坐标下以及将欧拉坐标与拉格朗日坐标相耦合条件下,对海冰的数值方法进行了深入研究。欧拉坐标下的有限差分法(FDM)是发展最早、也是目前应用范围最广的海冰数值方

法^[5~8]。为提高有限差分法在海冰数值模拟中的计算效率,线性超松弛迭代法(LSOR)、交替方向隐式法(ADI),以及适用于并行计算的共轭梯度法被进一步应用于海冰动力学的数值计算中^[9,10]。在有限差分法被广泛应用于不同海域海冰数值模拟中的同时,人们也注意到:该方法将海冰视为连续介质,描述的是网格内海冰的平均状态,不能精确地模拟海冰动力破坏时的区域性特点;在计算海冰连续方程平流项时存在数值扩散现象,尤其是处理冰边缘线时误差很大^[11]。因此,在应用有限差分法进行海冰动力学数值模拟的同时,一直在发展能够精确模拟海冰动力学特征的欧拉坐标与拉格朗日坐标相耦合的方法以及拉格朗日坐标下的计算方法^[12~15]。

自然条件下,海冰一般表现为冰、水两相介质共存状态,冰缘线的位置也极不规则。为合理地处理海冰动力学中冰、水介质的两相流问题,同时又能够精确模拟冰边缘线演化的动力过程,人们发展了欧拉坐标与拉格朗日坐标相耦合的计算方法。例如,采用自适应网格方法以跟踪冰边缘线的分布,并用于 Bering 海的海冰计算^[16];考虑海冰在中尺度下的离散分布和连续流变特性,发展了分布质量/离散块体模型(DMDF),用于 Okhotsk 海的海冰动力过程模拟^[17]。在欧拉坐标和拉格朗日坐标的耦合方法中,最有影响的是 Flato 在 Beaufort 海冰动力学模拟中建立的质点网格法(PIC)^[12]。尽管计算中没有考虑海冰热力作用过程,计算的冰边缘线位置与实际结果有一定的差异,但其精度已明显高于有限差分法。为进一步提高 PIC 方法的计算精度,采用 LSOR 差分方法进行海冰动量方程的计算,并在每个网格内放置更多的海冰质点^[13]。虽然 PIC 方法在欧拉网格和拉格朗日质点间相互插值过程中仍存在数值发散情况,但它同时具有欧拉方法和拉格朗日方法的优点,既可合理地计算海冰动力过程的流变行为,又可理想地处理冰水混合现象和冰缘线位置;另外,PIC 方法的重要优点是对重点分析区域可采用较多的质点进行精确计算,而在其他区域只保持较少的质点以减小计算量。最近,在渤海海冰数值模拟中也在尝试使用 PIC 方法,以提高海冰动力学的计算精度,满足冰期油气开发的工程要求。

海冰的现场监测和卫星遥感资料表明,海冰在极区及其冰缘区、副极区等不同海域均更多地表现出离散分布的特点,且平整冰、堆积冰、重叠冰、水道以及开阔水相互交织出现^[18~20]。冰块尺寸也在不同尺度下有很大的变化范围,可从极区大尺度下的 100km 以上到小尺度下的 1km^[21]。为了更好地描述海冰在离散状态下的动力特性,拉格朗日坐标下的海冰动力学计算方法有了很大的发展,其中最有代表性的是光滑质点流体动力学方法(SPH)和颗粒流体动力学方法。

SPH 方法是 Gingold 和 Monaghan 在研究天体物理动力学中建立和发展起来的^[22]。Shen 等最早将 SPH 方法引入到河冰动力学的数值计算中,并成功地模拟了 Niagara 河冰输运和冰塞形成过程^[23,24];随后,Gutfraind 等采用 SPH 方法对海

冰动力学过程进行了一系列的数值试验^[25];最近,SPH 方法又被应用于北极和渤海的海冰动力学数值模拟中^[26,27]。在海冰动力学的 SPH 计算中,各海冰质点的速度是通过海冰动量方程在拉格朗日坐标下求解的,因此不存在有限差分中的数值扩散现象,且能够精确地处理冰边缘线的移动位置。海冰厚度和密集度则通过计算调整各海冰质点的光滑长度和质量密度来确定,计算中采用具有很强连续性和计算精度的 Gauss 函数。严格地说,SPH 方法是建立在连续介质力学基础上的一种无网格计算方法。当海冰密集度较高时,SPH 方法可精确地计算海冰的连续流变特性;当开阔水的面积足够大,即相邻质点间的距离足够远时,海冰间的相互作用会因 Gauss 插值的弱化而迅速消失,从而又可模拟海冰的离散分布特性。由于 SPH 方法在进行冰间相互作用计算时,需要大量的循环计算和相邻质点的不断搜索,其计算时效限制了它在海冰数值预测和长期数值模拟中的适用性。因此,提高 SPH 方法的计算效率,将会进一步推进其海冰动力学中的应用。

2. 海冰本构模型

海冰本构模型研究一直是海冰数值模拟工作的重点和难点。为研究自然条件下海冰的动力学行为,人们对极区及副极区海冰动力过程中的应变(率)、应力和强度等力学参数,以及厚度、漂移速度和冰块尺寸等物理特征进行了现场浮标测量、雷达和卫星遥感监测,发现海冰在不同尺度下表现出不同的流变、断裂、堆积和碰撞等动力学特征。从 20 世纪 70 年代开始,海冰动力学本构模型由最初的线黏性模型开始不断发展和完善,目前大体可归为四类,即黏塑性及其改进模型、弹塑性模型、海冰颗粒流理论中的黏-弹-塑性模型和各向异性断裂损伤模型。

在目前海冰动力学本构模型中,应用范围最广的是 Hibler 的黏塑性模型^[5]。该模型考虑海冰在大、中尺度下表现出来的连续分布和塑性流变特性,将海冰应力和屈服曲线视为应变率的函数。该模型在中、长期海冰数值模拟和预测中有很强的计算时效性和稳定性,能够很好地描述海冰在大应变率条件下的塑性流动行为。采用该模型,Hibler 对北极海冰在计算网格为 100km,时间步长为 24h 的大尺度条件下进行了热力-动力耦合模拟^[5]。在渤海海冰的数值模拟中,吴辉碁等采用该模型并将网格尺度缩小为 8.65km×11.11km,时间步长为 1h 进行了中尺度下的海冰动力学计算,模拟的海冰厚度、密集度等结果与卫星遥感资料吻合^[8]。近年来,采用黏塑性本构模型对极区及亚极区海冰的动力演化过程进行了大量的数值计算,其网格尺度一般为 10~100km^[8,28,29]。在不同海域的海冰动力学模拟中,人们对 Hibler 黏塑性模型的屈服准则、海冰发生塑性屈服时的压力和屈服前的弹性力学行为进行了一系列的改进,以提高计算时效或使其更加符合自然条件下海冰的动力学特征。基于该黏塑性模型建立了空化流体模型以进行长期全球气候的研究^[30];应用土力学中主动和被动土压力的极限分析理论,确定了河冰/海冰在辐合

和辐散条件下的屈服强度^[23,24]; Hunke 等发展了弹-黏塑性本构模型以适用于海冰动力学的并行计算,以提高海冰数值模拟的计算效率和精度^[9];在渤海海冰的动力学数值模拟中,考虑海冰在小应变或小应变率条件下的黏弹性力学行为,发展了黏弹-塑性海冰动力学本构模型^[27,31]。另外,考虑海冰剪切破坏的性质,土力学中的 Mohr-Coulomb 屈服准则被引入黏塑性本构模型中^[32]。由此可见, Hilber 的黏塑性及其改进的本构模型在大、中尺度下对海冰的动力过程有很强的适用性。这主要是因为海冰在大、中尺度下因重叠和堆积而导致的塑性变形要远远大于其弹性变形,进而表现出很强的塑性流变行为。

弹塑性模型是在北极海冰动力学联合实验(AIDJEX)中,通过对海冰应力、应变的现场测量,将海冰在大、中尺度下视为二维连续介质而建立的^[33,34]。该模型将海冰简化为平面应力问题,考虑海冰在塑性屈服前的弹性力学行为,采用 Mohr-Coulomb 屈服准则和相关联的正交流动法则。它适用于时、空分别为 1~24h 和 5~100km 的大中尺度海冰动力学数值模拟^[35]。该模型因不考虑海冰应变率的影响,不能处理海冰的应力松弛和蠕变现象;更由于其在计算海冰塑性流动时的复杂性,在实际海冰动力学模拟中尚未得到较广的应用。

以上黏塑性和弹塑性本构模型均是建立在二维连续介质力学基础上的,尚不能精确地描述小尺度下(或冰块尺度下)海冰断裂、重叠、堆积的发生方位,以及冰块碰撞、破碎等动力学问题。为此, Shen 等基于颗粒流理论建立了黏塑性本构模型的海冰碰撞流变学,用于模拟离散冰块间的相互作用^[36]。在此基础上采用黏性、弹性和塑性模型来描述海冰形变、挤压破坏、摩擦、屈曲和弯曲破坏等作用过程,完善了海冰的颗粒流体动力学方法^[37,38]。目前,基于黏-弹-塑性本构模型的颗粒流方法不但可用于小尺度下冰块间的相互撞击模拟,还可用于中尺度下冰脊的形成、冰隙的产生以及冰缘区的海冰演化过程^[39]。大量的数值试验表明,颗粒流方法中的黏-弹-塑性本构模型能够合理地模拟小尺度下海冰动力学过程中的断裂、重叠和堆积现象,并且在大中尺度下海冰动力学计算中也有很强的适用性。

另外,为精确模拟海冰重叠、堆积和断裂过程中的方位特征,分别发展了各向异性断裂和损伤模型,对冰脊和冰隙发生的方向和尺度进行了初步研究^[33,40,41]。考虑到海冰断裂的尺度效应,研究了大尺度下的海冰各向异性力学行为与室内模型实验中冰内裂纹的产生和扩展的相似性^[20,42]。在极区大尺度海冰现场观测和室内模型实验的基础上,发展了考虑定向损伤的海冰动力学各向异性模型,用以模拟海冰堆积、断裂的动力过程^[41,43]。目前海冰动力学的各向异性本构模型仅处于探讨阶段,计算的稳定性和可靠性还需进一步验证。

在目前的海冰动力学本构模型中,无论是基于连续介质的黏塑、弹塑性本构模型,还是考虑海冰在离散状态下的黏-弹-塑性本构模型和各向异性断裂损伤模型,均没有考虑热力因素对海冰力学参数的影响。然而,现场观测和室内实验结果均

表明:海冰的压缩强度、拉伸强度、弹性模量、断裂韧性等力学参数与海冰的温度、盐度(卤水体积)等参数均有密切关系,而海冰的温盐特性又与其所处海域的气象、水文条件以及海冰的生长消融过程和冰期有密切关系^[44]。因此,将海冰的温盐特性引入海冰动力学的本构模型中具有重要意义。

1.1.2 海冰与大气、海洋的相互作用

海冰和大气、海洋之间不断地进行着热量、动量、质量和盐度的相互传递,这些过程相互耦合,极为复杂^[45,46]。人们曾尝试建立海冰边界层理论以研究这些耦合过程,并取得了一些进展。但在实际运用中,过多的数学处理和大量不易确定的计算参数使得其目前仅处于理论探讨阶段。在海冰数值模拟中,海冰同海洋、大气间的动力和热力相互作用主要还是通过块体公式等方法进行处理。即使这样,块体公式中需要通过大量现场实验和数值分析才能确定的计算参数在不同海域、不同冰情、不同气象和水文条件下还需要不断地调整修正。

海冰与大气的热力作用主要表现为冰面太阳辐射、长波辐射、感热和潜热。这些冰面热收支项的计算方法较为成熟。海冰与海洋的热力作用主要表现为海洋热通量。不同研究者所确定的热传递系数差异很大,这主要是由于热传递系数的大小与海水盐度、海冰类型和密集度等因素密切相关,而以往的工作又是在不同海域和海冰条件下进行的^[47~49]。

海冰与大气、海洋间的动力作用主要表现为风和流对海冰的拖曳力,与风和流的拖曳系数有直接关系。由于风和流对海冰拖曳力的大小直接影响到海冰漂移速度、轨迹,甚至关系到海冰间相互作用和动力破坏等问题,因此从20世纪50年代开始就对海冰拖曳系数进行了大量的研究。目前,确定海冰拖曳系数的方法可归为三类:涡动法、剖面法和动量法。利用动量法可同时确定风和流的拖曳系数,并可反映出其对海冰表面拖曳和形状拖曳的共同作用^[50]。但是由于海冰内力不易处理,因此该方法对密集度较小的冰情更具有实用性。大量研究表明,不同冰类型、密集度的海冰其表面粗糙度的不同导致其拖曳系数有很大差别;另外,根据海冰边界层理论,海冰拖曳系数还与冰盖的表面温度和盐度、海水和空气的运动黏滞系数等因素有关。因此,得到的拖曳系数有很大的离散性^[50~53]。

1.1.3 海冰的动力破坏

在自然条件下,海冰受风、浪、流和潮汐的作用不断地发生断裂、破碎、重叠和堆积,并表现出明显的离散分布特性。在极区,重叠冰和冰脊覆盖面积在不同季节有所差别,一般可占总冰面积的10%~40%,而冰量可达60%~70%^[54,55]。海冰的断裂、破碎、重叠和堆积过程非常复杂,且对海冰与大气、海洋间的热力和动力作用,以及海冰厚度、密集度的重新分布都有着重要的影响,因此人们一直致力于不