



“十三五”
国家重点图书

海洋工程材料丛书

Series
on Materials
for Marine Engineering

Titanium Alloys for Marine Applications

海洋工程钛金属材料

常 辉 主 编
廖志谦 王向东 副主编



化学工业出版社



“十三五”
国家重点图书

海洋工程材料丛书

Series
on Materials
for Marine Engineering

Titanium Alloys
for Marine Applications

海洋工程钛金属材料

常 辉 主 编
廖志谦 王向东 副主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

《海洋工程钛金属材料》是国家出版基金项目“海洋工程材料丛书”的分册之一。

本书在海洋工程钛金属材料的研究开发、生产及应用实际经验的基础上,结合中国工程院“中国海洋工程材料研发现状及发展战略初步研究”咨询项目和“海洋工程中关键材料发展战略研究”重点咨询项目的调研和研讨成果,从海洋实际使用工况及要求出发,对海洋工程钛金属材料体系、合金加工及性能、部件成形及焊接、钛合金的防腐蚀与防污损、钛合金的应用等进行了较为详尽的描述和总结。本书内容实用、指导性强,有利于读者了解和学习海洋工程钛金属材料从设计到应用的全过程。

本书可供从事海洋工程钛合金材料研究开发、生产及应用相关的技术人员使用,可为海洋工程装备设计技术人员在装备设计时提供选材参考,同时也可作为相关专业学生的学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

海洋工程钛金属材料/常辉主编. —北京:化学工业出版社, 2016.6
(海洋工程材料丛书)
ISBN 978-7-122-26869-3

I. ①海… II. ①常… III. ①海洋工程-钛合金-水
工材料-金属材料 IV. ①P754.5②TG146.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第082314号

责任编辑: 咎景岩 窦臻
责任校对: 吴静

文字编辑: 李玥
装帧设计: 尹琳琳

出版发行: 化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)
印装: 三河市航远印刷有限公司
787mm×1092mm 1/16 印张18 字数413千字 2017年1月北京第1版第1次印刷

购书咨询: 010-64518888(传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 88.00 元

版权所有 违者必究

“海洋工程材料丛书”

编委会

顾问：徐匡迪^{院士} 周济^{院士} 干勇^{院士} 王曙光

主任：周廉^{院士}

副主任：丁文江^{院士} 薛群基^{院士} 翁宇庆^{院士} 周伟斌

委员：(按姓名汉语拼音排序)

才鸿年 ^{院士}	蔡斌	常辉	陈建敏	陈祥宝 ^{院士}	陈蕴博 ^{院士}
丁文江 ^{院士}	窦臻	方志刚	高从堦 ^{院士}	宫声凯	韩恩厚
何季麟 ^{院士}	侯保荣 ^{院士}	黄国兵	蹇锡高 ^{院士}	李贺军	李鹤林 ^{院士}
李晓刚	李仲平 ^{院士}	李宗津	刘敏	刘振宇	马朝利
马伟明 ^{院士}	马运义	阮国岭	尚成嘉	沈晓冬	苏航
宿彦京	唐明述 ^{院士}	屠海令 ^{院士}	王国栋 ^{院士}	王景全 ^{院士}	王向东
王一德 ^{院士}	翁宇庆 ^{院士}	吴有生 ^{院士}	徐芑南 ^{院士}	薛群基 ^{院士}	杨雄辉
曾恒一 ^{院士}	张金麟 ^{院士}	赵解扬	肇研	周克崧 ^{院士}	周廉 ^{院士}
周守为 ^{院士}	周伟斌	朱英富 ^{院士}	左家和		

编委会办公室

主任：李贺军 马朝利 常辉 贾豫冬

成员：(按姓名汉语拼音排序)

陈俊 邓桢桢 丁洁 丁陵 杜伟 冯余其 李伟峰
陶璇 王帅 王媛 徐克 姚栋嘉 余启勇 眭景岩

《海洋工程钛金属材料》

编委会

主任 周 廉^{院士} 李鹤林^{院士} 何季麟^{院士}

副主任 常 辉

委员 (按姓名汉语拼音排序)

常 辉 方志刚 何季麟^{院士} 胡宏杰 计 波 贾栓孝 李鹤林^{院士}
李 军 廖志谦 马运义 唐仁波 王向东 赵洪章 赵永庆
周 廉^{院士}

编写人员名单

主 编 常 辉

副主编 廖志谦 王向东

参加编写人员 (按姓名汉语拼音排序)

常 辉 陈 军 计 波 贾栓孝 李士凯 李献民 李争显
廖志谦 唐仁波 王浩楠 王蕊宁 王瑞琴 王向东 王 莹
席锦会 谢英杰 熊进辉 杨永福 于卫新 张日恒

序

进入 21 世纪以来,材料特别是新材料已被视为新技术革命的基础和先导。海洋材料长期以来并未被纳入新材料体系范畴,发展速度远远落后于航空、航天材料。21 世纪是海洋的世纪,人类生存和发展越来越依赖于海洋。党的十八大后,建设海洋强国成为重要国策,海洋工程装备及海洋材料作为拓展海洋空间、开发海洋资源的物质前提,是实施海洋科技创新、建设海洋生态文明的物质基础,是提升海洋国防实力、维护海洋权益的物质保障。发展好我国的海洋材料,对实现海洋强国目标将产生重要的积极作用。

海洋的重要性主要体现在三个方面。首先,海洋经济是国民经济的重要组成部分,而海洋经济的发展离不开海洋资源的开发和利用,海洋资源的合理利用能够实现海洋经济的可持续发展。其次,海洋安全是国土安全的重要支撑,因此维护海洋安全至关重要,是国家海洋发展战略的重要组成部分。再次,海洋面积之大,海洋中物质、生物之多及自然现象之复杂,其重要性不亚于陆地及空天,对海洋的科学研究有助于人们认识海洋、了解自然。鉴此,海洋不仅已成为人类赖以生存、社会借以发展、濒海国家持续安泰昌盛的战略发展空间和基地,而且已成为当今世界军事和经济竞争的重要领域,军事竞争的焦点日益转向争夺海上控制权。

海洋资源主要有海洋矿产资源、海水资源、海洋生物资源、海洋旅游资源等。对海洋资源的利用包括海洋交通运输、海洋油气矿业、海洋渔业及生物资源、风力发电、潮汐发电、海水淡化等。海洋材料包括对这些海洋资源开发利用的工程装备(各种离岸、近岸工程建设以及勘探开采油气矿物资源所需的机械工程装备、海洋交通运输装备等)用材料。

海洋材料也包括涉及海洋安全的军用舰船(如航空母舰、护卫舰、潜艇等)和执法船用材料,以及用于各种海洋科学研究的装备和仪器(如海洋考察船、极地科考船、深海装备、海底电缆等)用材料。

2013—2014 年,中国工程院分别启动了“中国海洋工程材料研发现状及发展战略初步研究”“中国海洋工程中关键材料发展战略研究”两个咨询项目,中国工程院化工、冶金与材料工程学部联系机械、环境、能源等学部 30 余位院士,组织了全国 200 余位海洋工程领域的专家、学者,历时两年多的时间完成了咨询项目,对海洋工程材料领域的共性问题、关键技术和特殊应用领域进行了深入的调查和研究,为建立我国海洋工程材料完善的科学体系提供咨询建议,使“一代海洋材料,一代海洋装备”的理念更加深入人心,被誉为至理名言。以此为基础,本项目组组织国内材料领域的众多知名专家、学者,编撰了这套“海洋工程材料丛书”。丛书凝聚了 200 余位科学家和工程技术专家的群体智慧。

海洋材料应是海洋中各种工程装备应用材料的总称,是指在能适应海洋恶劣的环境、抵抗海水和生物体的侵蚀、能满足各类海洋工程装备应用需求的环保的可持续发展的材料。本套丛书内容除了包括海洋工程装备范畴的海洋资源利用开发等涉及的材料,还包括海洋安全、海洋科学研究涉及的材料。

丛书紧扣国家海洋强国的战略需求,从“材料”“腐蚀防护”“工程装备”三个层面,总结和梳理了改革开放 30 年来我国海洋材料及应用方面的基础理论积累、重大研究和应用成果,重点突出了关键技术,介绍了国内外在该领域的先进技术、装备和理论研究,并展望了海洋材料和材料技术的发展趋势。丛书共有十一个分册,分别是《中国海洋工程材料发展战略咨询报告》《海洋工程钢铁材料》《海洋工程钛金属材料》《海洋工程有色金属材料》《海洋工程聚合物基复合材料》《海洋工程水泥与混凝土材料》《船舶装备与材料》《海洋石油装备与材料》《海水资源综合利用装备与材料》《海洋工程材料腐蚀行为与机理》《海洋工程材料和结构的腐蚀与防护》。其中,海洋工程装备材料的腐蚀与防护是解决海洋工程材料应用的核心技术,除在各材料分册有关章节予以描述之外,《海洋工程材料和结构的腐蚀与防护》及《海洋工程材料腐蚀行为与机理》分册又对海洋腐蚀的特点、腐蚀机理、材料防腐要求等方面进行了专门论述。这套丛书另一个突出亮点是材料与海洋工程装备应用的结合,专设三个分册分别叙述了船舶装备、海洋石油钻井平台及海水综合利用等几个主要海洋工程领域的发展现状、发展趋势以及对各种材料的需求。

丛书内容颇为广泛,具有较强的创新性、理论性和实用性,较好地反映了海洋工程材料及应用的全貌,文字深入浅出,简洁明了,系统介绍了相关材料的特点和应用,能为读者从不同应用范围、不同材料及技术等角度了解海洋工程材料提供很好的帮助,具有较高的学术水平和应用价值。本丛书增强了材料科学与应用的结合,必将对推动我国海洋材料的发展起到积极的作用。

希望本丛书的出版,能够对从事船舶、海洋工程基础及应用研究、生产单位的科技工作者系统地了解 and 掌握本领域的发展现状和未来,在重大工程和装备的选材设计、制备加工、防护技术、服役安全等方面提供理论支撑和技术指导,对进一步开展创新研究工作有所帮助,同时也可以作为广大材料专业的本科生及研究生的参考教材。

中国工程院院士



2016 年 3 月

前言

占地球表面积 71% 的蔚蓝色海洋，为人类提供了丰富的食物资源、矿产资源和能源，是人类三大资源宝库，日益成为人类拓展生存空间的重要场所。党的十八大发出了“提高海洋资源开发能力，发展海洋经济，保护海洋生态环境，坚决维护国家海洋权益，建设海洋强国”的历史最强音。习近平总书记在中共中央政治局就建设海洋强国进行集体学习时也指出，“建设海洋强国必须大力发展海洋高新技术，着力推动海洋科技向创新引领型转变”。建设海洋强国，实现海洋经济创新发展，先进的高性能海洋工程装备是必要的前提和重要保障。

钛金属质轻、高强、无磁、耐蚀，特别突出的是耐海水和海洋大气腐蚀，是优异的轻型结构材料，被称为“海洋金属”。钛及钛合金在海洋工程中具有广泛的用途，特别适于作轻型海工装备用材，对提高海洋工程装备的作业能力、安全性、可靠性及技术水平具有十分重要的意义，是先进高性能海洋工程装备的关键材料，是建设海洋强国的重要战略材料之一。

我国海洋工程用钛金属材料经过 50 余年的发展，已经取得了很大的进步，初步形成了由低到高不同强度级别的钛合金材料体系，其制备加工装备水平和世界其他主要钛工业强国处于同一水平，但同美、俄、日等海洋强国相比，在海洋工程装备用钛合金基础研究、钛合金制备加工技术、钛合金应用技术、钛装备和部件的设计技术以及相应配套技术等各个环节还有较大差距。这些差距主要表现为：①海洋工程用钛的基础性工作薄弱。针对钛合金在海洋复杂环境（深海高压、低温交变、动静载荷交变、多种介质腐蚀等）中的耐腐蚀性、疲劳、振动及海生物污损等问题方面缺乏深度基础研究；对许多钛合金材料只做了短时间、小范围、小规格产品的研究，离大型工程应用要求还有很大的差距；钛在海洋工程装备中应用的设计规范和标准不完善，设计、应用与材料研发脱节现象严重。②海洋用钛的比例低。2012~2014 年，我国在化学工业、航天、海洋工程三大钛应用领域内，钛金属材料及制品的平均消费比例分别为 50%、8.5% 和 3.7%，海洋工程用钛比例最低，其总用量仅约 2000 吨。③海洋工程用钛存在许多空白。目前钛在舰船上应用，大都属小型、低端产品和点式应用，且没有形成系统配套，只在泵、阀、管道、紧固件、天线等辅助产品中用钛。许多海岸、岛屿、船舶及海上石油开采装备等均见不到钛材应用的身影，钛的使用基本为空白。上述差距使得我国钛合金在海洋工程装备上的应用范围和数量还十分有限，对我国海洋工程装备的高性能化产生了一定的影响。

目前，在我国前所未有的重视海洋开发及海洋经济创新发展的重要历史机遇时期，钛及钛合金材料的价格也正好处于历史的最低阶段，这为钛合金材料在海洋工程上的推广和应用

提供了最佳的发展时机。我国海洋工程领域用钛金属材料的前景非常看好,相信在不远的将来,我国海洋工程用钛一定会取得重大突破,其应用量将会达到相当可观的规模。

中国工程院从2012年开始,先后立项开展了由周廉院士、薛群基院士和翁宇庆院士共同负责的“中国海洋工程材料研发现状及发展战略初步研究”咨询项目和“海洋工程中关键材料发展战略研究”重点咨询项目。钛金属材料作为这两个咨询项目的重要组成部分,由南京工业大学牵头,联合了我国钛及钛合金研发、生产和海洋工程应用的骨干单位,历时三年时间,以现场调研、文献调研和学术研讨等形式,较为系统地开展了国内外海洋工程领域用钛及钛合金材料和技术的研究、生产和应用现状的调研工作,完成的《中国海洋工程材料发展战略咨询报告》中的钛金属材料部分,较为详细地综述了我国海洋工程装备用钛及钛合金材料和技术的发展和应用现状,指出了存在的问题和未来的重点发展方向。本书就是在这样一个背景下完成的,并成为“海洋工程中关键材料发展战略研究”重点咨询项目的一个重要成果形式。

本书编者在多年来从事海洋工程用钛合金材料的研究、生产和应用实际经验的基础上,结合多次学术研讨会的成果,完成了本书的编写工作。全书共分为5章,由常辉担任主编,廖志谦和王向东担任副主编。其中第1章由张日恒主笔编写;第2章由陈军、杨永福、贾栓孝、常辉主笔编写,谢英杰、王瑞琴、席锦会、王蕊宁、李献民、计波、唐仁波、王莹等协助编写;第3章由廖志谦主笔编写,李士凯、熊进辉、于卫新协助编写;第4章由李争显主笔编写,王浩楠协助编写;第5章由常辉主笔编写。

感谢邓炬教授和吴爱珍教授对本书提出的宝贵修改意见和建议。

编者们真诚希望本书的出版对读者能有所裨益,为推动我国海洋工程用钛金属材料的研究、生产和应用以及先进海洋工程装备的发展尽绵薄之力。

由于本书编者的学识和水平有限,同时也受限于写作时间,书中难免有不妥之处,恳请读者批评指正。

南京工业大学

常 辉

2016年6月

目录

第 1 章 海洋与钛金属材料

1.1 海洋的战略地位	1
1.2 海洋及海洋环境	2
1.2.1 海水温度	2
1.2.2 海水的盐类和盐度	2
1.2.3 海水的运动	3
1.2.4 地震及海啸	4
1.2.5 海冰	4
1.2.6 海水的腐蚀性	4
1.2.7 海洋大气的腐蚀性	4
1.2.8 海生物污损	4
1.3 海洋装备	5
1.4 典型海洋装备服役工况	6
1.4.1 船舶装备工况条件	6
1.4.2 深海装备工况条件	6
1.4.3 海洋工程装备工况条件	6
1.5 海洋装备及船体结构对材料的要求	7
1.6 钛及钛金属材料概述	7
1.6.1 钛金属材料特点及其海洋适应性	8
1.6.2 海洋钛金属材料概念	11

第 2 章 海洋工程钛金属材料的性能

2.1 概述	12
2.1.1 船用钛合金材料	15
2.1.2 能源开发用钛合金材料	18
2.2 海洋工程用钛合金材料熔炼与加工	19
2.2.1 海洋工程用钛合金熔炼	19
2.2.2 海洋工程用钛合金半成品锻造	25
2.2.3 海洋工程用钛合金材料的加工	26
2.3 低强钛合金的性能	28
2.3.1 工业纯钛	28
2.3.2 TA9	40
2.3.3 TA10	47

2.3.4	TA16	55
2.3.5	TA22	60
2.4	中强钛合金的性能	68
2.4.1	TA5	68
2.4.2	TA17	73
2.4.3	TA18	77
2.4.4	TA24	87
2.5	高强钛合金的性能	90
2.5.1	Ti-5111	90
2.5.2	TA31	92
2.5.3	TC4、TC4ELI	94
2.5.4	ZTC4	114
2.5.5	TC10	120
2.5.6	TB9	139
2.5.7	Ti-B19	147

第 3 章 海洋工程钛金属材料成形加工技术

3.1	钛及钛合金的机械加工技术	153
3.1.1	车削	154
3.1.2	铣削	154
3.1.3	磨削	154
3.1.4	钻削	155
3.1.5	铰削	155
3.1.6	攻丝	155
3.2	钛及钛合金的铸造成形技术	156
3.2.1	钛及其合金的铸造设备	156
3.2.2	钛铸件的造型材料及造型方法	156
3.2.3	国内海洋工程用钛合金铸件的力学性能	157
3.3	钛及钛合金的锻造成形技术	157
3.3.1	钛合金锻造前的加热	158
3.3.2	钛合金的自由锻	159
3.3.3	钛合金的模锻与等温锻造	162
3.4	钛及钛合金板材的成形技术	163
3.4.1	无模多点成形技术	163
3.4.2	拉形技术	164
3.4.3	橡皮成形技术	165
3.4.4	喷丸成形技术	166
3.4.5	热冲压成形技术与装备	166

3.4.6 超塑成形/扩散连接技术与装备	166
3.5 钛及钛合金管件的成形技术	167
3.5.1 液压成形	167
3.5.2 热推成形	168
3.5.3 缩径/扩径成形	168
3.6 钛及钛合金表面处理技术	169
3.6.1 钛合金构件高温及耐磨涂层制备技术	169
3.6.2 钛合金构件减摩、耐磨涂层制备技术	170
3.6.3 金属构件绝缘涂层制备技术	170
3.7 成形技术发展趋势	171
3.7.1 铸造成形	171
3.7.2 塑性成形技术	171
3.8 钛及钛合金焊接技术	171
3.8.1 概述	171
3.8.2 钛及钛合金的焊接特点	171
3.8.3 各种合金元素对焊接接头性能的影响	172
3.8.4 杂质元素对钛焊接性的影响	173
3.8.5 钛及钛合金的焊接材料	174
3.8.6 钛及钛合金焊接工艺的制定	175
3.8.7 典型焊接方法	176
3.8.8 焊接残余应力与变形	188
3.9 钛合金焊接件的无损检测技术	190
3.9.1 钛合金焊缝射线探伤	190
3.9.2 钛合金焊缝超声波探伤	196
3.9.3 钛合金材料常用的无损检测标准	202
3.10 焊接技术发展趋势	203

第 4 章 海洋工程钛金属材料的腐蚀、污损与防护技术

4.1 钛金属材料海水腐蚀行为	204
4.1.1 钛金属材料耐腐蚀性能	204
4.1.2 海洋环境中钛的耐腐蚀性能	207
4.2 钛金属海洋环境下的防护	219
4.2.1 防缝隙腐蚀方法	219
4.2.2 防电偶腐蚀方法	222
4.3 钛金属材料海洋生物防护	225
4.3.1 钛金属材料海洋生物污损状况	225
4.3.2 钛金属材料海洋生物污损危害	227
4.3.3 钛金属材料海洋生物附着防护方法	231

第 5 章 钛金属材料在海洋工程中的应用

5.1 钛金属材料在舰船上的应用 243

5.1.1 耐压壳体 243

5.1.2 动力及海水管路系统 249

5.2 钛金属材料在海洋能源开发装备中的应用 254

5.2.1 钛金属材料在海上石油天然气勘探与开发中的应用 254

5.2.2 钛金属材料在其他海洋能源开发中的应用 257

5.3 钛金属材料在海水淡化及滨海电站领域的应用 258

5.3.1 海水淡化装置 258

5.3.2 滨海电站 258

5.4 其他应用 259

参考文献 260

索引 267

第 | 章

海洋与钛金属材料

- 1.1 海洋的战略地位
- 1.2 海洋及海洋环境
- 1.3 海洋装备
- 1.4 典型海洋装备服役工况
- 1.5 海洋装备及船体结构对材料的要求
- 1.6 钛及钛金属材料概述

1.1 海洋的战略地位

海洋油气开发，尤其是深水和超深水油气资源勘探开发，已经成为世界各国能源战略的重点领域。有专家估计，深海能源储量将是陆地能源储量的 100 倍。据统计，2008 年全球发现的储量在 4 亿桶油当量以上的重大油气田共有 14 个，主要来自海洋区域，尤其是深海区域。目前，全球已有 60 多个国家正在进行深海油气勘探。国际能源署（International Energy Agency, IEA）发布的《世界能源展望 2010》（World Energy Outlook, 2010）指出：到 2035 年，世界石油总需求量将会较目前增长 26%，其中新兴经济体国家将增长 53%。目前陆上现有油田产油高峰已过，到 2035 年总产油量与目前基本持平，供需矛盾突出。为了解决能源供需矛盾，大力开发海洋资源，发展海洋经济已成为许多国家，特别是发达国家和新兴经济体的共同目标。可以断定，21 世纪以及未来很长的时间里，海洋争夺必将成为世界各国发展的重要战略取向，海洋将成为激烈的国际竞争场所。21 世纪被称为“海洋的世纪”。

我国是一个经济大国，对能源的需求量大。根据国际能源机构测算，2010 年我国对外石油依存度为 61% 左右，2020 年将达到 76.9%。另据《世界能源展望 2030》预测分析，中国将是未来石油消费增长的最大用户。到 2030 年，中国的石油消费量将增长 800 万桶/日，达到 1750 万桶/日，超过美国而成为世界上最大的石油消费国。因此，如何解决这样巨大的供需矛盾是我国经济发展面临的重要问题。

我国是一个海洋大国，海洋面积为陆地面积的 1/3，陆地海岸线长度为 18000 多千米，享有主权和管辖权的海域面积接近 300 万平方千米。我国南海有十分丰富的油气资源，石油地质储量

为 230 亿~300 亿吨, 占我国油气资源的三分之一。据 2008 年公布的第三次全国石油资源评价结果, 我国海洋石油资源量为 246 亿吨, 占全国石油资源总量的 23%; 海洋天然气资源量为 16 万亿立方米, 占天然气总量的 30%。

另外, 在蔚蓝的大海中, 海洋生物有 16 万种, 可为人类提供丰富的营养物质和医药原料。在水深 2000~4000m 的海底, 大约储存有 3 万亿吨锰结核, 并富含锰、铁、铜、钴、钛、镭、铀等 40 多种金属, 其储量为地球陆地同种矿产储量的几十倍或几百倍。海洋之中还有用之不竭的动力资源。据估计, 海洋潮汐能量功率达 10 亿千瓦, 波浪能 700 亿千瓦, 海流能 10 亿千瓦, 海水温差能 20 亿千瓦, 还有取之不尽、用之不竭的海上风能和太阳能。

海洋孕育了人类, 为人类活动提供可持续发展的强劲动力。加强海洋控制, 建设海洋强国, 实现海洋经济的创新发展, 将成为世界各国特别是亚洲国家激烈角逐的主旋律。为此, 认识海洋, 发展先进的海洋工程装备和海洋钛金属等先进材料具有十分重要的战略意义。

1.2 海洋及海洋环境

海洋环境是一个多变的复杂系统, 其工况条件与内陆存在较大的差别。大洋一般远离大陆, 面积广阔, 水深在 2000m 或 3000m 以上, 盐度、水温不受大陆影响, 季节变化小, 透明度大, 有独立的潮汐系统和强大的洋流系统。海一般邻靠陆地, 水深在 2000m 或 3000m 以内, 盐度、水温受大陆影响, 有显著的季节变化, 透明度小, 没有独立的潮汐系统, 潮汐一般从大洋传来, 涨落显著。

1.2.1 海水温度

大洋昼夜温差小, 年温度差小, 空气湿度大, 年降雨较内陆多。海水的温度取决于太阳辐射过程、大气与海水之间的热量交换和蒸发等因素。大洋中水温为 $-2\sim 30^{\circ}\text{C}$, 深层水温低, 大体为 $-1\sim 4^{\circ}\text{C}$ 。大洋表层水温的分布主要取决于太阳辐射和洋流性质。表层水温等温线大体与纬线平行, 低纬水温高, 高纬水温低。北半球大洋的年平均水温约高于同纬的南半球 3.2°C 。

海洋水温在垂直方向上的分布与水层所处深度密切相关。在 1000~2000m 的上部水层内, 水温从表层向下层降低很快, 而超过 2000m 以后水温几乎没有变化。大致在南、北纬 45° 之间, 海水水温的垂直分布可分三层:

① 混合层, 一般在大洋表层 100m 以内, 由于对流和风浪引起海水的强烈混合, 水温均匀, 垂直梯度小。

② 温跃层, 在混合层以下和恒温层以上, 水温随深度增加而急剧降低, 水温垂直梯度大。

③ 恒温层, 在温跃层以下直到海底, 水温一般变化很小, 常在 $2\sim 6^{\circ}\text{C}$, 尤其在 2000~6000m 深海区, 水温为 2°C 左右, 故称恒温层。

1.2.2 海水的盐类和盐度

海水含有丰富的盐类物质。海水中的盐类不仅向人类提供资源, 还使海水性质具有了与陆地不同的特点。溶解于海水的物质, 主要是氯化物, 其次是硫酸盐。海水所含盐量通常

以盐度表示。盐度是指在 1000g 海水中,将所有硫酸盐转变为氧化物,将所有溴化物和碘化物转换成氯化物,并将所有有机物完全氧化后,所含固体的总质量(g)。盐度用符号 $S_{\text{‰}}$ 表示。大洋上盐度的空间变化不大,在 35‰ 左右,但在邻接大陆的海域,盐度差别很大。一般来讲,在蒸发量大、降水量少、没有河水注入的海域,其盐度较大,如红海北部盐度高达 42.8‰。而在蒸发量小、降水量大、有许多河水注入的海域,其盐度则较低,如波罗的海表层盐度多在 10‰ 以下。在干、湿季节明显交替的海域,如季风区海域,表层盐度也有明显季节变化。我国的长江口外,夏季海水盐度为 25‰,冬季为 30‰。海水的密度变化主要受盐度变化制约,因此大洋上盐度的差异也就造成了海水密度的差异。

1.2.3 海水的运动

海水在各种力的作用下不停地运动着,波浪、潮汐和海流等都是海水的运动形式。海水运动是直接影响海上结构物安全的海洋动力因素,也是海上结构物规划、设计和建造中必须研究的海洋环境条件。

1.2.3.1 波浪

海洋表面及其内部的各种波动现象称为波浪。波浪是海水主要运动方式之一。波浪主要是由外力作用产生的。当海水受到外力作用时,水质点在其平衡位置附近作周期性振动。海浪对海上航行、海港和海岸工程、各种海洋作业有重要的影响,尤其是风暴潮的破坏性更大。风暴潮是由于剧烈的大气扰动,导致海水异常升降,使受其影响海区的潮位大大地超过平常潮位的现象。风暴潮的成因主要是大风引起的增水和天文大潮高潮叠加。风暴潮根据风暴的性质,通常分为由台风引起的台风风暴潮和由温带气旋引起的温带风暴潮两大类,其中:台风风暴潮来势猛、速度快、强度大、破坏力强;温带风暴潮增水过程比较平缓,增水高度低于台风风暴潮。

狂风、巨浪是最具破坏力的海洋灾害。风暴潮灾害居海洋灾害之首。世界上绝大多数因强风暴引起的特大海岸灾害都是由风暴潮造成的。我国东临西北太平洋,台风较为频繁,台风登陆或接近时容易造成风暴潮灾害。在我国海洋石油开发海域,大风是主要的灾害性天气之一,寒潮、台风、气旋、反气旋、雷暴以及龙卷风等都可能引起大风大浪。

1.2.3.2 潮汐

潮汐是海水在太阳、月球起潮力的作用下形成的一种周期性涨落运动。起潮力的大小与太阳、月球的质量成正比,而与太阳、月球至地心距离的三次方成反比。因此,太阳质量虽然远大于月球,但月地距离却比日地距离小得多,故月球起潮力大于太阳起潮力。在潮汐升降的每一周期中,上升过程称为涨潮,海面上涨到最高位置时称为高潮;下降过程称为落潮,海面下降到最低位置时称为低潮;高潮和低潮的潮水位差称为潮差。大洋中潮差不大,近陆海区潮差较大,但受地形的影响,潮差在各处不相同。

1.2.3.3 海流

海流由潮流和风海流组成,在海流的各种成分中,潮流通常占据主导地位。海流是海水在天文、水文、气象等因素或重力作用下沿某一定方向稳定流动的现象,是海水一种重要的运动形式。形成海流的动力条件很多,其中主要的是密度流和风海流。密度流是因海水温度、盐度和压力的分布不均而引起的水体流动;风海流是由风对水面摩擦而产生的海水水平流动。从水温来看,如果海流水温比其流经海区的水温高称为暖流,若比其流经海区的水温

低则称为寒流。一般说来,从低纬流向高纬的海流属于暖流;从高纬流向低纬的海流属于寒流。暖流可以从低纬地区向高纬地区输送热量,对气候影响很大。世界上大洋表层的海流环流形式,基本上取决于地球上的大气环流形式,并受海陆分布制约。在北半球,绕副热带高压中心流动的,是一个顺时针方向的环流;绕副极地低压流动的,是一个逆时针方向的环流。在南半球,与副热带高压区相应的环流为逆时针方向。但在高纬地区因副极地低压同极地高压基本上呈带状,与纬圈平行,所以海流也与纬圈平行。

1.2.4 地震及海啸

地震是地下岩石突然断裂而发生的急剧运动。岩石圈板块沿边界的相对运动和相互作用是导致海底地震的主要原因。海底地震可引发海啸,海底地震及其所引起的海啸会给人类带来重大灾难。我国是一个多地震的国家,海域中时有地震发生。强烈的地震是海上工程设施破坏的主要外加载荷,一旦在地震中结构物发生破坏,除其直接经济损失极大外,其次生灾害——火灾、环境污染等的后果也不堪设想。

1.2.5 海冰

在我国北方海域(渤海和北黄海),冬季受寒潮影响,在沿岸地区经常会有严重的结冰现象,容易出现冰害。在辽东湾石油开发区,海冰及其对海上结构物引起的冰荷载已成为威胁结构物安全和影响油气田开发经济效益的关键环境条件。海冰不但会对海洋结构物施以强大的冰压力,而且由于冰激引起的振动作用,也会给海洋平台的使用和安全带来巨大的损害。所以,在北方海域建造的海洋平台,抵抗冰害成为必须要解决的课题之一。

1.2.6 海水的腐蚀性

海水具有很强的腐蚀性。海水中含有大量盐类、溶解氧、二氧化碳、海生物和腐败的有机物等,是一种具有一定流速和盐度的电解质溶液。海水中的氯化物、硫酸盐、碳酸盐等盐类物质,绝大部分呈离子状态存在于海水中,主要有氯、钠、镁、硫、钙、钾、溴、碳、锶、硼、氟等。海水含盐量高,可导致海水对金属材料的腐蚀性增强。我国不同海域的海水腐蚀性不同。南海海水具有高温、高盐等特点,其腐蚀性明显高于黄海与东海。

1.2.7 海洋大气的腐蚀性

研究表明,海洋大气对金属材料也具有较强的腐蚀性。海洋大气环境极其复杂,随着地球经纬度和海岸地理条件的变化,温度、湿度、辐照度、氯离子浓度、盐度、污染物如 SO_2 等主要环境因子及其耦合作用对材料腐蚀行为的影响差异很大,因此对其腐蚀特性与机理的认识不能一概而论。

我国不同海域的海洋大气腐蚀特性也不一样。南海海洋大气污染程度低,腐蚀性较弱。黄海海洋大气环境具有高污染的特点, SO_2 沉积率较高,因此,黄海海洋大气的腐蚀性能较强。东海海洋大气环境虽然污染因素不及黄海,但是其雨水的pH值却明显低于其他各海域,表现出明显的酸雨特性。

1.2.8 海生物污损

海生物污损也是海洋环境明显的特点之一。海洋中生存着成千上万种海生物,其中的许