



“十三五”  
国家重点图书

海洋工程材料丛书

Series  
on Materials  
for Marine Engineering

Offshore  
Oil Equipment  
and Materials

海洋石油装备与材料

李鹤林 等编著



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

Offshore  
Oil Equipment  
and Materials



# 海洋石油装备与材料

李鹤林 等编著



化学工业出版社

· 北京 ·

《海洋石油装备与材料》是国家出版基金项目“海洋工程材料丛书”的分册之一。

本书在概述海洋石油装备发展现状的基础上,深入剖析了海洋石油平台、钻采装备、海上储运设施的结构功能、服役条件(载荷条件和环境条件)及对材料性能的要求,分析了海洋石油装备的选材、用材及材料标准化,讨论了关键构件的失效模式、失效案例及失效的预测预防,并对海洋石油装备与材料的发展提出了建议。

本书可供从事海洋油气勘探、开发、储运的工程技术人员和管理人员参考,还可供海洋石油装备及材料的设计、研究和制造单位的工程技术人员和管理人员参考,也可供相关专业的高等院校师生阅读。

### 图书在版编目(CIP)数据

海洋石油装备与材料/李鹤林等编著. —北京:化学工业出版社, 2016. 4

(海洋工程材料丛书)

ISBN 978-7-122-26283-7

I. ①海… II. ①李… III. ①海上油气田-机械设备  
②海上油气田-材料 IV. ①TE9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 027859 号

---

责任编辑: 窦 臻 晁景岩

责任校对: 宋 玮

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 刷: 三河市航远印刷有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 25 字数 623 千字 2016 年 10 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: 99.00 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<sup>院士</sup> 周济<sup>院士</sup> 干勇<sup>院士</sup> 王曙光

主任：周廉<sup>院士</sup>

副主任：丁文江<sup>院士</sup> 薛群基<sup>院士</sup> 翁宇庆<sup>院士</sup> 周伟斌

委员：（按姓名汉语拼音排序）

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

---

# 《海洋石油装备与材料》 编委会

---

主 任 李鹤林<sup>院士</sup> 曾恒一<sup>院士</sup>

副主任 张冠军 姜 伟 刘汝山

委 员 (按姓名汉语拼音排序)

曹 静 段梦兰 冯耀荣 高惠临 韩 彬 霍春勇 姜 伟

李鹤林<sup>院士</sup> 李清平 刘汝山 刘亚旭 马秋荣 申 炼 王炳诚

王进全 谢 彬 闫相祯 曾恒一<sup>院士</sup> 张冠军 张运通 赵文轸

赵新伟 钟文军

秘书长 杜 伟

# 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

石油、天然气，被人们称为“工业的血液”，既是重要的能源，又是重要的战略物资。据美国地质调查局（USGS）评估，世界（不含美国）海洋待发现石油资源量（含凝析油）548亿吨，待发现天然气资源量78.5万亿立方米，分别占世界待发现油气资源量的47%和46%。因此，全球海洋油气资源潜力巨大。

陆上油气田已逐步进入开采的中后期，勘探开发难度增大，成本升高，因此海洋油气资源的勘探开发越来越重要。大陆架浅水区域的油气资源勘探开发起步较早，需要延伸至海上深水区。深水区域油气资源的勘探开发对水上平台、水下钻采设备提出了更高的要求。同时，深水海域油气资源利用管道输送可增加经济性，海底油气管道的需求量增大，同样面临着向深海发展的技术难题。

海洋结构处于风、浪、流、蚀等恶劣环境下，特别在深海海域使用的石油天然气开发和储运装备，对材料提出了更高的要求。同时，海洋设备的服役期一般都超过20年，设计要求免维护或者少维护，没有高性能材料作为保障，海洋石油天然气的开发将受到很大制约。

近年来，我国材料技术虽然已取得长足进步，但与国际先进水平和我国发展需求相比，仍然存在诸多方面的不足。为了确切把握我国海洋工程材料的研发、生产和使用现状及今后发展方向，同时为政府管理部门提供制定政策和决策的可靠依据，2013年和2014年，中国工程院先后启动了“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”咨询项目。两个项目的海洋石油装备与材料专业组由中国石油天然气集团公司、中国海洋石油总公司的相关人员组成，李鹤林院士任组长。2013年11月，中国石油天然气集团公司咨询中心和石油管工程技术研究院承担了“集团公司海洋油气开发装备材料的现状、发展动向及工程应用”咨询项目，亦由李鹤林院士任组长，石油管工程技术研究院张冠军院长为副组长。上述项目分别历时2~3年，搜集了国内外大量的文献资料，走访了10余个和海洋石油装备与材料相关的科研、制造和使用单位，编写了咨询报告。报告从海洋石油天然气资源开发利用方面阐述了我国海洋平台、海洋钻采装备以及海底管道输送系统中的材料现状、存在问题、发展趋势及建议。在上述咨询报告的基础上，结合编者的实际科研和实践工作成果，经进一步加工和充实，形成了“海洋工程材料丛书”的《海洋石油装备与材料》分册。

本书的总体思路和编写提纲由李鹤林院士提出，经丛书编委会和分册编委会讨论审定。编写工作由中国石油天然气集团公司咨询中心、石油管工程技术研究院（石油管材及装备材料服役行为与结构安全国家重点实验室）、宝鸡石油机械有限责任公司（国家油气钻井装备



工程技术研究中心)、渤海石油装备制造有限公司的工程技术人员和中国石油大学(北京)、中国石油大学(华东)的教师承担。其中,1.1节由王炳诚、段梦兰,1.2节由杜伟、李鹤林,2.1节由王懿、刘学文,2.2节由王懿,2.3节由杜伟、李鹤林,2.4节由韩涛,2.5节由徐秀清、白真权,2.6节由张玉、赵新伟,3.1节由韩彬、李鹤林、蒲容春、党恩,3.2节由赵卫民、邓平、党恩,3.3节由于思荣、李鹤林、杜伟,3.4节由林学强、熊伟、邓平,3.5节由孙建波、邓平、李鹤林、党恩,3.6节由李焰,3.7节由李焰、韩彬、李鹤林、杜伟,3.8节由李鹤林、韩礼红,4.1节由池强、王海涛、魏斌、李鹤林、戚东涛、罗金恒、李发根、白真权,4.2和4.3节由安晨,4.4节由熊庆人编写完成。全书由李鹤林统稿。全书由中国海洋石油总公司曾恒一院士和姜伟副总工程师组织中海油研究总院和海洋石油工程股份有限公司的专家审校。

本书编写出版工作是在中国工程院、中国石油天然气集团公司、中国海洋石油总公司的领导和支持下完成的。以周廉院士为首的“海洋工程材料丛书”编委会指导和引领了本书的技术路线和方向,而且做了大量的组织协调工作。《海洋石油装备与材料》的编写人员团结协作、克服困难,按期完成了任务。谨向各级领导和全体编、审人员表示衷心感谢!

在考察调研和本书编写过程中,得到了河北华北石油荣盛机械有限公司、上海美钻机械设备有限公司、苏州道森钻采设备有限公司、上海神开石油化工装备股份有限公司等相关单位的大力支持和帮助,在此表示感谢!

本书具有较强的前瞻性、实用性,可供从事海洋石油天然气钻采、储运和装备设计与制造的领导干部、工程技术人员参考。

由于本书涉及内容广泛,加之编著者水平所限,不足之处在所难免,恳请广大读者指正。

《海洋石油装备与材料》编委会

2016年1月

# 目录

## 第 1 章 海洋石油装备与材料概论

1.1 海洋石油装备概论 .....	1
1.1.1 海洋油气田开发基本概念 .....	3
1.1.2 海洋油气钻井装备 .....	5
1.1.3 海洋油气生产设施 .....	10
1.1.4 海洋管线及其他储运设施 .....	16
1.2 海洋石油装备材料概论 .....	18
1.2.1 海洋石油装备对材料的性能要求 .....	18
1.2.2 海洋石油装备材料的类别及其应用 .....	19
1.2.3 建议 .....	34
参考文献 .....	35

## 第 2 章 海洋石油平台对材料的需求及应用

2.1 海洋石油平台概述 .....	36
2.1.1 海洋石油平台发展现状 .....	36
2.1.2 海洋石油平台分类及特点 .....	37
2.1.3 新型海洋石油平台 .....	41
2.1.4 国内外海洋平台生产及应用概况 .....	42
2.2 海洋石油平台服役条件 .....	49
2.2.1 海洋石油平台的载荷条件 .....	49
2.2.2 海洋石油平台的环境条件 .....	54
2.3 海洋平台用钢 .....	56
2.3.1 海洋平台用钢的需求 .....	56
2.3.2 海洋平台用钢的类别及形式 .....	58
2.3.3 海洋平台用钢的性能要求及标准分析 .....	63
2.3.4 国内外海洋平台用钢的研发应用现状 .....	81
2.3.5 海洋平台用钢的发展趋势 .....	95
2.4 海洋平台的焊接 .....	98
2.4.1 海洋平台高强钢的焊接 .....	98
2.4.2 海洋平台用双相不锈钢的焊接 .....	107
2.4.3 海洋平台的水下焊接技术 .....	110
2.5 海洋平台的腐蚀与防护 .....	114
2.5.1 海洋平台的腐蚀 .....	114
2.5.2 海洋平台的防护技术 .....	117
2.5.3 海洋平台的腐蚀监(检)测技术 .....	122

2.6 海洋平台的失效预测预防 .....	125
2.6.1 海洋平台的主要失效模式 .....	125
2.6.2 海洋平台的典型失效案例 .....	127
2.6.3 海洋平台失效的预测预防 .....	132
2.6.4 海洋平台的风险评估 .....	136
2.6.5 基于风险的平台检测 .....	140
参考文献 .....	142

## 第 3 章 海洋钻采装备对材料的需求及应用

3.1 海洋钻机 .....	149
3.1.1 海洋钻机概述 .....	149
3.1.2 海洋钻机服役条件 .....	153
3.1.3 海洋钻机结构功能及对材料性能的要求 .....	154
3.1.4 海洋钻机用钢现状与发展趋势 .....	158
3.1.5 海洋钻机主要失效模式及防止失效的措施 .....	167
3.2 钻井隔水管 .....	169
3.2.1 钻井隔水管概述 .....	169
3.2.2 钻井隔水管服役条件 .....	171
3.2.3 隔水管的材料选择及性能要求 .....	172
3.2.4 隔水管焊接及接头评价 .....	176
3.2.5 隔水管主要失效模式及防护方法 .....	182
3.2.6 隔水管材料性能评价及发展趋势 .....	184
3.3 水下防喷器 .....	184
3.3.1 水下防喷器概述 .....	184
3.3.2 国内外水下防喷器的技术现状及发展趋势 .....	188
3.3.3 水下防喷器的服役条件 .....	189
3.3.4 水下防喷器材料性能要求及材料选择 .....	190
3.3.5 水下防喷器的检验 .....	197
3.4 水下井口头 .....	199
3.4.1 水下井口头系统概述 .....	199
3.4.2 水下井口头系统服役条件 .....	200
3.4.3 水下井口头材料标准 .....	201
3.4.4 水下井口头常用金属材料 .....	202
3.4.5 水下井口头常用高分子密封材料 .....	203
3.4.6 水下井口头典型部件的选材 .....	203
3.4.7 水下井口头防腐蚀涂层要求及操作 .....	204
3.4.8 水下井口头材料性能评价及发展趋势 .....	206
3.5 水下采油树 .....	206
3.5.1 水下采油树概述 .....	206
3.5.2 水下采油树服役条件 .....	207
3.5.3 水下采油树的材料选择及性能要求 .....	209

3.5.4	水下采油树防护 .....	215
3.5.5	水下采油树材料性能评价 .....	215
3.6	跨接管 .....	216
3.6.1	跨接管概述 .....	216
3.6.2	跨接管服役条件 .....	219
3.6.3	跨接管的材料选择、性能要求及关键技术指标 .....	220
3.6.4	跨接管材料的应用现状及未来的发展趋势 .....	224
3.7	水下阀门 .....	225
3.7.1	水下阀门概述 .....	225
3.7.2	水下阀门的服役条件 .....	226
3.7.3	水下阀门的材料选择及性能要求 .....	227
3.7.4	水下阀门主要失效模式 .....	233
3.7.5	水下阀门常用表面强化方法 .....	233
3.8	油井管 .....	237
3.8.1	概述 .....	237
3.8.2	油井管服役条件与失效模式 .....	237
3.8.3	油井管的标准与钢级 .....	242
3.8.4	国内外油井管产业现状及发展趋势 .....	252
	参考文献 .....	258

## 第 4 章 海洋管线及其他储运设施对材料的需求及应用

4.1	海底管道 .....	265
4.1.1	海底管道概述 .....	265
4.1.2	海底管道的服役条件 .....	269
4.1.3	海底油气管道的材料性能要求 .....	277
4.1.4	海底管道的失效控制及安全评价 .....	319
4.2	立管 .....	334
4.2.1	立管的服役条件 .....	334
4.2.2	立管种类及材料选择 .....	336
4.2.3	立管的主要失效模式及安全评价 .....	352
4.3	脐带缆 .....	357
4.3.1	脐带缆概述 .....	357
4.3.2	脐带缆的服役条件 .....	359
4.3.3	脐带缆的功能、结构及材料选择 .....	360
4.3.4	脐带缆的主要失效模式及安全评价 .....	365
4.4	LNG 船及储罐用钢 .....	368
4.4.1	LNG 船储罐系统 .....	368
4.4.2	LNG 储罐 .....	370
4.4.3	9%Ni 钢 .....	373
	参考文献 .....	377

索引 .....	381
----------	-----

# 第 | 章

## 海洋石油装备与材料概论

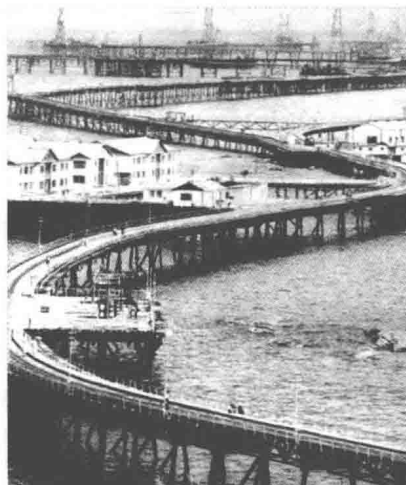
- 1.1 海洋石油装备概论
- 1.2 海洋石油装备材料概论

### 1.1 海洋石油装备概论

自从 19 世纪末在美国西海岸和里海等滩涂区域发现石油后，人们开始了近海油气资源的勘探和开发。从最开始岸边滩涂地带的木质石油平台 [图 1-1 (a)、(b)] 到 1947 年首座钢结构平台 (图 1-2) 投入使用，海洋石油进入了一个依托钢质结构平台逐渐向更深水深发展的阶段。钻井和生产的水深不断突破，新型平台结构不断涌现，推动了海洋石油装备的持续发展。



(a) 美国加州滩涂地带的木质钻井平台



(b) 前苏联里海100km近岸的木质平台

图 1-1 早期木质石油平台

海洋石油装备的发展完全是海洋油气田不断向深水推进而助推的。20 世纪 80 年代，产

## 2 海洋石油装备与材料

油大国和国际大油公司开始了深海油气资源的勘探开发，虽然至今仅有 30 多年的历史，但在世界范围已掀起深海油气勘探开发的热潮。由于深水油气田在北海、墨西哥湾、西非和巴西海域的大量发现，用于钻井和生产的平台也从浅水的固定平台逐渐发展出满足不同水深的顺应式 (CT)、半潜式、张力腿 (TLP)、深吃水立柱式 (SPAR) 平台，以及钻井船、浮式生产储油 (FPSO)、浮式钻井生产储油 (FDPSO) 等 (图 1-3) 众多装置<sup>[1,2]</sup>。



图 1-2 美国路易斯安那州世界首座钢质钻井平台

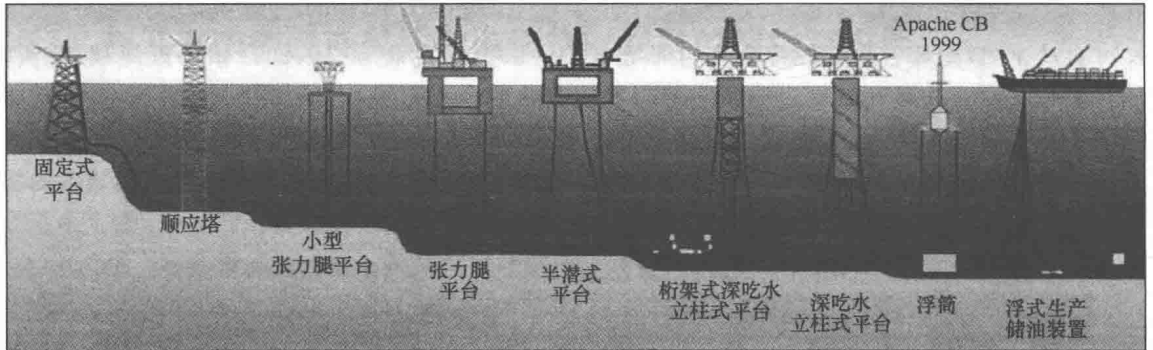


图 1-3 满足不同水深的钻井与生产平台

为了满足更深水深、降低油气开发成本以及深水开发本身的技术需要，水下生产系统以水下采油树为代表在 20 世纪 60 年代应运而生，并成为超深水 (1500m 以上水深) 油气田开发不可缺少的模式 (图 1-4)。

油气生产和集输催生了海底管道和立管系统，它们和水下生产系统一起又发展了用于海上安装的各类起重铺管装置及配套安装机具。而随着天然气运输的需要，不同类型的 LNG 船也得到了大力发展，这为我国海外油气通道提供了新的保障。

迄今为止，海洋钻井已经突破 3000m 水深，海洋生产也超过 2500m 水深，这些突破都是依靠深水装备及技术的创新得以实现的。海洋石油装备一般按三大类加以划分，即水面设施、水下系统、海底管线与立管系统。水面设施主要包括各类钻修井和生产平台、起重铺管船、LNG 船、各类工程作业船；水下系统包括水下采油树、管汇及其吸力基础、跨接管、连接器、水下基盘、分离与回注系统、增压系统、电力单元、水下井口、防喷器 (BOP)

总成及平台与钻完井密切相关的装置，水下运载与作业机具也划分在水下系统中；海底管线与立管系统通常也涵盖水下立管、隔水管系统、脐带缆等。本书的重点不是对海洋石油装备的系统论述，而是讨论海洋石油装备对材料的需求与应用。为便于从装备的服役条件出发，分析不同装备对材料服役性能的需求，我们选择了一些有代表性的重要装备；在装备的类别划分上也有一些调整：水面设施类，主要讨论海洋平台（第2章），而将海洋钻采装备（包括钻机、隔水管及水下生产系统）列为第3章，油气储运设施为第4章。

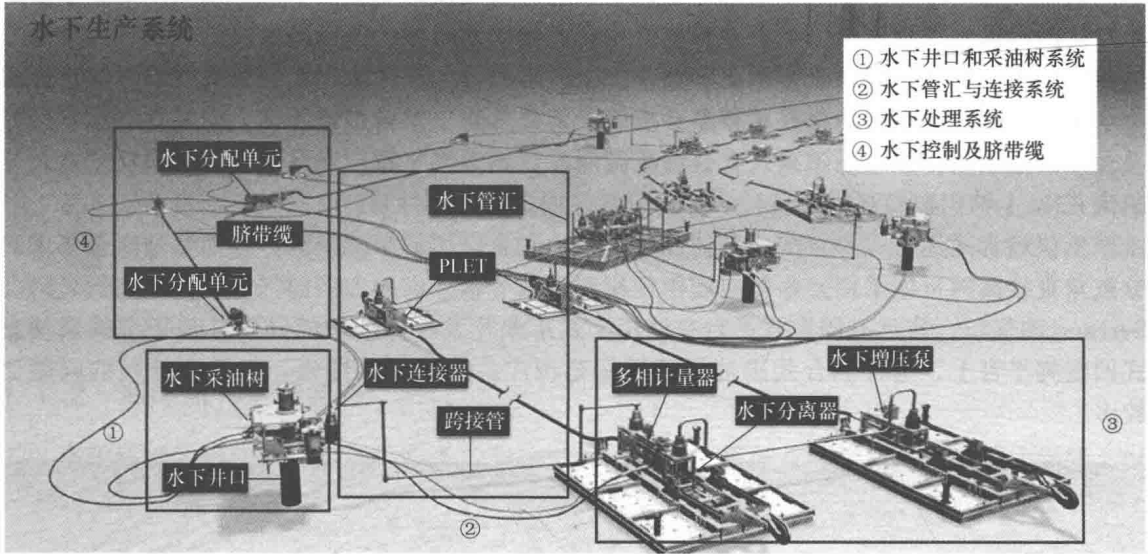


图 1-4 水下生产系统及其主要装置

### 1.1.1 海洋油气田开发基本概念

(1) 海洋石油开发阶段 海洋石油的开发大致分为三个阶段，即地球物理勘探阶段、勘探钻井阶段和油气田开发阶段。第一阶段是普查性的地球物理勘探。通常使用地震勘探船来进行，利用爆震波测地层反射波等方法查找可能储油气的地质构造。第二阶段是在找到的构造上打勘探井，包括打初探井查明是否有油气存在，以及打评价井来确定油田的分布、品位和储量等情况，以便制定开发方案。第三阶段是打生产井和进行油气的采集、处理、储存、运输等生产设施的建设并进行生产。也可把地球物理勘探和勘探钻井作为勘探阶段，把油气田开发分为开发建设阶段和采油阶段。本节重点介绍开发建设阶段使用的钻井设备以及采油阶段使用的油气生产设施。

(2) 海洋油气田开发工程模式 海洋油气田开发工程模式取决于水深、油气藏特征、油气产量、离岸距离、水文环境条件等诸多因素；同时也取决于各个时期的开发技术水平和装备制造能力。

海洋油气田开发可以根据采油方式的不同主要分为干式采油、湿式采油和干湿组合式采油三种。

干式采油是将水下井口和采油树置于水面以上采油平台的甲板上，井口作业（包括钻井、完井、修井等）均可在甲板上进行。大部分固定式开发平台都采用干式采油方式。这种采油方式由于井口在平台上，因此修井及设备维修方便，所需的井口设备成本低。但由于使

用固定式平台，解脱不便，对气候比较敏感，因此在浅水区应用较多。深水区应用主要是在墨西哥湾，Magnolia 油田使用 TLP 开发水深达 4700ft<sup>①</sup> (1432m)，Devils 油田使用 SPAR 开发水深达 5600ft (1706m)。但在我国南海深水区未有应用，一方面是南海地区环境恶劣，台风问题较严重；另一方面是我国在这两种深水平台研发方面的技术尚不够成熟。

湿式采油是将水下井口和采油树置于海底或水中，所有井口作业（包括钻完井和修井等）均需通过浮式平台操作。由于这种采油方式的采油设备一般在水下，因此其水下部分的采油设施称为水下生产系统，而这种模式也可以称为使用水下生产系统开发的模式。水下生产系统的水深应用范围广，所有水域均可用；开发模式灵活，依托平台可选范围广，几乎可以依托所有采油平台以及无平台式开发（如图 1-5 所示）；水下设备受水面环境影响小。但是水下设备比干式设备价格要高很多，安装、修井及水下设备维修不便，尤其是在深水区修井及维修成本高。湿式采油模式在全球范围深水应用最多，我国也已有多个油田应用，最早的流花 11-1 油田以及最近的荔湾 3-1 气田都使用了湿式采油模式。

干湿组合采油模式是将湿式采油和干式采油联合应用的采油模式。在油藏分布呈集中和分散双重特征时可以采用。一般应用于使用固定式平台开发的大型油气田，例如墨西哥湾的 Serrano 油气田。或已有固定式平台在使用干式采油开发，但新增的开发井使用湿式采油方式回接到平台上。这种混合式采油模式适用范围广，开发灵活性强，但需要处理的问题比较多。

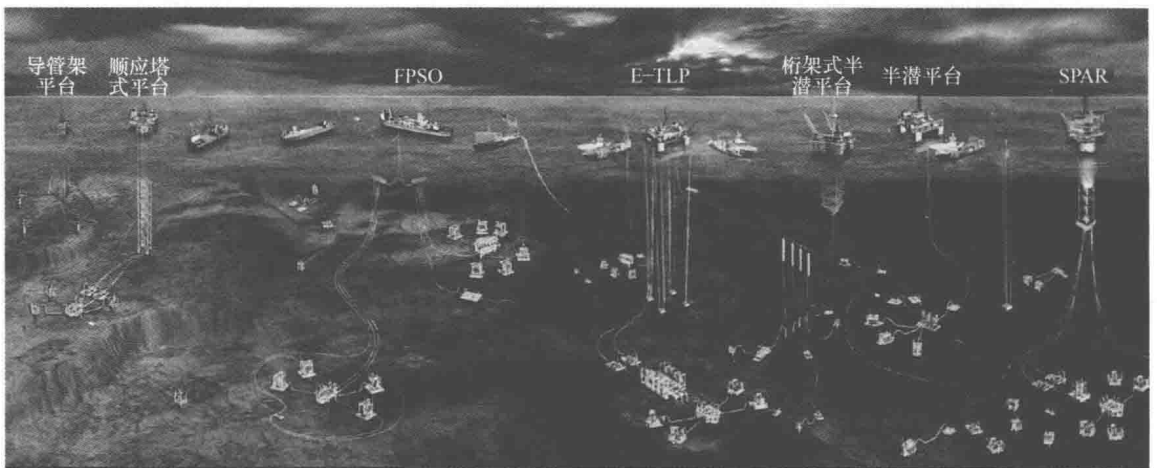


图 1-5 几种典型的湿式采油模式

(3) 深水石油开发 首先我们要明确“深水”的概念。随着油气勘探开发技术的不断进步，钻采作业的水深范围不断扩展，深水钻采记录被不断刷新，“深水”的定义也在不断变化。在早期大约 20 世纪 60 年代，“深水”定义为水深大于 100m 的海域；而到 80 年代增长到 300m；到 2002 年巴西世界石油大会，进一步加深至 400m。而目前普遍认可的定义是水深大于 500m 小于 1500m 的海域为常规深水区，而大于 1500m 小于 3000m 的海域为超深水区，大于 3000m 的海域为极深水区。从开发情况看，常规深水区是开发的热点，超深水开发技术也日趋成熟，极深水区的钻井已经成功<sup>[3]</sup>。

① 1ft=0.3048m。



深水石油开发较浅水区开发难度进一步增大,对技术、装备、操作等各方面都是挑战。水深的增加,提高了对钻井装备及相关配套设备的要求,随之也带来了一系列的影响。水深增加,要求隔水管更长、钻井液容积更大以及设备的压力等级更高,隔水管与防喷器的重量等均大幅增加,所以必须具有足够的甲板负荷和甲板空间。另一方面,水深增加,加之深水恶劣的作业环境,使得钻井非作业时间增加,目前深水一口钻井费用在3000万~6000万美元之间,如果钻井船处于磨合期,一口钻井的费用将在6000万~12000万美元之间。对设备的可靠性要求苛刻,选择深水钻井装置、设备和技术时都要针对水深进行单独校核。海底温度低,钻井液的黏度和切力大幅度上升,会出现显著的胶凝现象,而且增加形成天然气水合物的可能性及风险。随着水深的增加,地层的破裂压力梯度降低,致使破裂压力梯度和地层孔隙压力梯度之间的窗口较窄,极易发生井漏、井喷等复杂情况。

在生产方面,主要是使用水下生产系统+浮式平台开发。水下设备的费用除高昂的价格外,更重要的是由于水深而带来的安装和修井问题,很多浅水区的安装方法不再适用,由于深水导致隔水管、防喷器等设备下放及回收时间增加,从而导致安装船只的租费大幅增加(海上船舶租费一般按天计算)。由于修井费用高昂,修井往往也被列为深水石油开发重点考虑的因素之一。

### 1.1.2 海洋油气钻井装备

海洋环境的特殊条件对钻井装备的影响很大,故海上平台及钻井设备除必须达到陆上设备的要求外,还要具备适合海上油气开发特点(经受得起风、浪、潮、流、冰、涌等海洋环境因素的冲击)的结构,以克服在海上作业的困扰。

(1) 海洋钻井平台 目前,海洋钻井平台主要分为固定式与移动式两类(见表1-1)。结构概念上,海洋油气钻井装备由固定式向浮式发展;结构形式上,由自升式向半潜/船形发展;定位形式由立柱式向锚泊/动力定位发展;适用水深逐步增加至3000m。

表1-1 海洋钻井平台的类型

基本类型	细分类型		适用水深	我国使用情况
固定式	桩基式	导管架	<460m	较多
		顺应式	<531m	无
	重力式	混凝土式	<350m	无
		钢重力式		
		钢-混凝土式		
	张力腿式(TLP)	传统 TLP	300~1500m	无
		Mini-TLP		
		ETLP		
	深吃水立柱式(SPAR)	传统 SPAR	600~3000m	无
		Truss SPAR		
Cell SPAR				
移动式	底撑式	自升式	<168m	较多
		坐底式	<30m	有
	浮动式	半潜式	90~3000m	有
		钻井船	100~3000m	无

注:适用水深及可钻深度最大值均为已知应用最深,不代表限定值。

固定式平台主要应用于浅水,固定于海底,在整个使用寿命期内位置固定不变,一般不