

CAMBRIDGE



船舶与海洋复合材料 结构物工程应用技术

Composite Materials in Maritime Structures
Practical Considerations

[英] R.A.Shenoi J.F.Wellicome 著
梅志远 李华东 张焱冰 刘 令 译



科学出版社

船舶与海洋复合材料 结构物工程应用技术

Composite Materials in Maritime Structures
Practical Considerations

[英] R. A. Shenoi J. F. Wellicome 著
梅志远 李华东 张焱冰 刘 令 译



科学出版社

北京

图字:01-2017-2182

内 容 简 介

本书为 R. A. Shenoi 和 J. F. Wellicome 所著的 *Composite Materials in Maritime Structures* 的第 2 卷 *Practical Considerations*。主要阐述复合材料及其结构的相关理论在船舶、艇筏、海洋工程及深海装备的设计和建造过程中的工程应用。内容涵盖常见船舶复合材料结构的设计方法、胶黏剂的应用、复合材料结构制造技术;涉及复合材料结构实际使用方面的考虑,如复合材料结构对砰击载荷、疲劳性能响应;阐述复合材料结构的设计准则、质量和安全性评估及设计的管理与组织。

本书可作为船舶工程和海洋工程专业的研究生、教师及学者的教材和参考书籍,并可从事船舶与海洋复合材料结构物设计与工程应用的科学工作者、研究人员及技术工人提供复合材料结构工程应用的相关知识。

Composite Materials in Maritime Structures Volume 2 Practical Considerations, first edition (0-521-08994-4) by R. A. Shenoi, J. F. Wellicome first published by Cambridge University Press 1993

All rights reserved.

This simplified Chinese edition for the People's Republic of China is published by arrangement with the Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom.

© Cambridge University Press & China Science Publishing & Media Ltd. (Science Press) 2018

This book is in copyright. No reproduction of any part may take place without the written permission of Cambridge University Press and China Science Publishing & Media Ltd. (Science Press)

This edition is for sale in the People's Republic of China (excluding Hong Kong SAR, Macau SAR and Taiwan Province) only.

此版本仅限在中华人民共和国境内(不包括香港、澳门特别行政区及台湾地区)销售。

图书在版编目(CIP)数据

船舶与海洋复合材料结构物工程应用技术/(英)R. A. 施诺依(R. A. Shenoi), (英)J. F. 韦尔科姆(J. F. Wellicome)著;梅志远等译. —北京:科学出版社,2018. 9

书名原文:Composite Materials in Maritime Structures—Practical Considerations

ISBN 978-7-03-058696-4

I. ①船… II. ①R…②J…③梅… III. ①船舶工程-复合材料结构 IV. ①U663. 9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 198503 号

责任编辑:张艳芬 姚庆爽 罗 娟 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:师艳茹 / 封面设计:陈 敬

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>

河北鹏润印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 9 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2018 年 9 月第一次印刷 印张:14 1/4

字数:282 000

定价:128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

译者序

随着 20 世纪 40 年代初玻璃增强热固性塑料(玻璃钢)的出现,以纤维增强树脂基复合材料(fiber reinforced plastic, FRP)为主要工程应用对象的船舶复合材料结构设计技术开始得到持续关注与发展。FRP 具有比强度高、无磁、耐腐蚀和抗海洋生物侵蚀等众多固有优良性能;同时,FRP 结构所具有的优异的可设计性,也为船舶结构的发展开辟了崭新领域。这种可设计性不仅体现为复合材料的铺层可设计性,更为重要的是,FRP 结构还能够在保证船舶结构强度和刚度的条件下,通过与功能材料的合理复合、结构形式优化设计,同时实现多种功能特性的兼容,这就为未来功能型船舶结构的设计与建造提供了广阔的发展空间和无限的可能。

40 多年来,随着我国国民经济的蓬勃发展,复合材料结构设计技术在我国航空航天领域内的发展尤其迅猛,而在船舶与海洋工程领域的应用却相对迟缓,尤其是在舰船复合材料结构工程应用领域,甚至出现了需求大于能力、工程先于理论的尴尬状态。以猎扫雷舰艇为例,2010 年以前,全世界 32 个濒海国家已建造全复合材料猎扫雷舰艇共计 391 艘,而我国至今没有一艘在役。究其原因,译者认为主要有三方面:首先,长期以来,船舶设计界总是将复合材料结构设计问题归结为材料问题,而忽视了总体需求与结构设计体系的主导作用;其次,与我国以往长期粗放式的发展模式以及船舶全寿命费用概念并没有真正得以贯彻落实不无关联;最后,我国船舶结构设计者对于新材料的应用过于谨慎,在紧迫工程进度要求下,熟悉且技术成熟度较高的钢质或铝质船体结构往往成为首选。

本书的英文原著虽成文较早,但它系统全面地阐述了船舶复合材料体系的选用,复合材料船体结构的设计、制造、生产管理、质量管理以及设计团队组织的基本模式与要求。书中提出的所应遵循的船舶复合材料结构设计、生产与管理的基本原则、特点及规律等,大多数在今天仍然具有很好的指导意义。因此,译者认为将其引入我国,以供船舶结构设计者和相关专业研究生参考学习是必要的。

本书在编译过程中得到课题组研究生的大力支持,周晓松、陈国涛、郑健、王亚楠、刘建良、杨国威等硕士和博士研究生参与编译了本书的部分章节,付出了辛勤的劳动,在此一并表示衷心感谢。

感谢海军工程大学研究生教材基金及海军工程大学科研自主立项项目对本书出版的资助。感谢威海威复合材料制品有限公司在材料选型及制备工艺方面所提供的技术支持。

尽管编译组希望尽可能真实、清楚地向读者传达原著写作思想,但因为水平有限,书中难免存在不足,还望读者批评指正。

梅志远 李华东 等
海军工程大学舰船与海洋学院
2018年5月

原 书 序

20 世纪 50 年代初以来,纤维增强树脂基复合材料(fibre reinforced plastic, FRP,本书中简称复合材料)在船舶与海洋(本书中简称船海)结构物设计建造领域的应用得到稳步发展。早期 FRP 主要用于制造小型船艇,如救生船和游艇。随着工程技术的发展,依照规范建造的排水量达数百吨的复合材料船舶结构物已逐渐在工程中得到应用。同时,一些潜在的应用领域也不断得以开发,从雷达天线罩、桅杆、复合材料管件到大尺度海洋结构物,如水面船舶主船体结构、上层建筑结构、潜艇结构以及离岸工程结构物等。

随着投入使用的复合材料船舶数量以及结构物尺度的不断增长,材料技术、制作工艺方法以及设计流程也逐步成熟和完善。现在复合材料结构在重量、强度以及制造成本等方面全面超越金属结构已经成为可能,但这种超越的前提是必须具有完整且良好的复合材料结构生产质量控制体系。此外,全面系统的复合材料及相关结构力学知识体系也是设计和生产管理者所必须具备的。

本书及其姊妹篇将所收集到的素材,通过汇编整理为相互独立的两册。它们将为大尺度船海复合材料承载结构的设计和制备提供理论基础,并通过实例讲解复合材料在船海结构物工程设计领域的应用特点。

第 1 册书名为 *Composite Materials in Maritime Structures - Fundamental Aspects*,主要介绍复合材料结构的材料科学基础、复合材料结构的失效机理及强度理论,包括经典层合板理论、夹层板刚度理论等,还对数值计算方法予以介绍,如有限元分析方法。

第 2 册书名为 *Composite Materials in Maritime Structures - Practical Considerations*,主要介绍复合材料船海结构物工程应用问题,即本书。书中通过专门章节介绍复合材料排水型船舶以及滑艇的设计问题,讨论了单壳船体结构和夹层船体结构的生产制备以及材料与结构损伤特征。最后,结合实例分析,阐述规范设计对产品质量影响的重要性以及设计管理工作的复杂性。

两册书各章节的作者都是船海工程复合材料结构物设计和生产领域内的国际知名专家,分别来自企业、船级社和科研院校。他们为这两册书的编撰倾注了大量心血,在此编委会对他们的辛勤劳动和付出表示感谢。

1993 年 3 月南安普敦大学举办第 18 届 WEGEMT 研修班,这两册书的素材被整理为授课讲义。WEGEMT 是欧洲海洋技术领域的大学联盟组织,该组织旨在提供继续教育平台,鼓励相关从业人员和研究生在 28 个成员单位内部进行交

流,培养研究兴趣。研修学员大多具有相关专业研究生以上学历,主要来自造船厂、设计部门或船舶公司,他们希望通过参加研修,更为广泛深入地理解复合材料船海结构物的设计特点,以期今后工作的开展打下基础。

我们希望这两册书能引起从事复合材料结构相关技术工作者的兴趣。它们可作为高年级本科生或研究生教材,也可为研究人员继续教育提供参考。编撰本书的初衷是立足于海洋工程领域,但书中的相关素材和案例同样可为其他领域复合材料结构的工程应用提供帮助和参考。

第 18 届 WEGEMT 研修班由国际指导委员会组织建立,委员会主要成员如下:

- | | |
|-------------------|---|
| O. Gullberg 先生 | Karlskronavarvet AB, Sweden(瑞典) |
| A. Marchant 先生 | AMTEC, UK(英国) |
| M. K. Nygard 教授 | Veritas Research & University of Oslo, Norway(挪威) |
| H. Petershagen 教授 | University of Hamburg, Germany(德国) |
| R. Porcari 博士 | CETENA, Italy(意大利) |
| H. Scholte 工程师 | Delft University of Technology, The Netherlands(荷兰) |

国际指导委员会审查通过了本书内容安排,并帮助挑选课程讲授人员,对此编委会深表感谢。举办研修班所需要的部分经费得到了 COMETT 基金会的支持,主要来自伦敦海洋科技有限公司理事会所管辖的大学与企业联合培训中心执行委员会。在此,编委会对于 WEGEMT 秘书长 J. Grant 先生在获取 COMETT 基金支持和研修班的宣传工作中所付出的辛勤劳动深表感激。

最后我们对南安普敦大学船舶工程系的 W. G. Price 教授及其他同事的鼓励、支持和帮助表示感谢。对 L. Cutler 女士为两册书的出版在文字和图片处理与编辑、排版等方面所做的大量专业性劳动表示衷心感谢。

R. A. Shenoi, J. F. Wellicome
Southampton

章节介绍

本书主要从四个方面阐述复合材料在船海工程领域的工程应用问题,即设计方法、生产制备工艺、服役或使用,以及安全与质量管理。

第1、2章主要讨论排水型船舶和水动力支承型船舶的设计问题,由于设计载荷、船型、材料体系选型以及制造工艺等方面技术特征的典型性,应用背景选定为猎扫雷舰和滑艇。这两章内容较为全面地涵盖了两型船舶复合材料船体结构设计的各个方面。

第3、4章着重探讨在复合材料次级结构制作过程中使用胶黏剂和连接接头细节设计的重要性。

第5、6章针对单壳加筋结构和三明治夹层结构的生产制备工艺展开讨论。前者是传统舰船板架结构形式的衍生,而后者在小型专业赛艇,如“美洲杯”赛艇结构选型,得到越来越多的青睐。

第7~9章对复合材料结构在服役或使用过程中存在的主要问题加以介绍。第7章的学习,希望使船东和船员能清楚地了解和认识复合材料船体结构缺陷(如裂纹和气泡),以及当缺陷出现时应如何处理,以确保船体结构的安全性。第8章主要介绍典型海洋载荷作用下复合材料结构的典型响应特征,以及在大载荷作用下可能出现的失效模式等。一般商用船舶的使用寿命可达25年以上,因此充分理解船体材料和结构的长期使用特性也是非常必要的(第9章)。

最后一个方面是安全性和生产质量管理问题。虽然这是一个普适性的议题,但它对于复合材料船海结构物的设计意义重大。迄今为止,在船海工程领域大规模的复合材料结构应用还主要集中于船、艇和潜艇结构物等,但离岸工程领域的应用需求目前已在逐步增长。因此,关于其主要设计特点,以及其特殊使用要求,如防火问题等,应该得到关注(第10章)。长期以来,国际海事组织和不同国家的监管部门一直希望能对船舶和其他海洋工程结构物的设计质量及安全性进行规范化与标准化管理。因此,对船海复合材料结构物的设计者、生产者和使用者而言,知晓各种相关法令、法规和设计规范是非常必要的(第11、12章)。最后,因为复合材料结构物设计所具有的复杂性,以及不同阶段所存在的庞大信息管理的需要,第13章对如何开展细致的设计组织工作进行介绍。

目 录

译者序

原书序

章节介绍

第 1 章 排水型船舶设计	1
1.1 引言	1
1.1.1 背景	1
1.1.2 复合材料船舶结构的优异性	1
1.1.3 案例研究	2
1.2 材料选型与测试	2
1.2.1 一般性要求	2
1.2.2 制备工艺影响因素	3
1.2.3 生产检验试验	4
1.2.4 力学性能测试与计算	4
1.2.5 耐久特性	5
1.3 设计准则	6
1.3.1 概述	6
1.3.2 设计安全系数	6
1.3.3 载荷	7
1.4 结构设计	7
1.4.1 结构形式	7
1.4.2 设计因素综合分析	10
1.5 结论	16
参考文献	17
第 2 章 水动力支承型船舶设计	18
2.1 引言	18
2.2 概念设计	18
2.2.1 概述	18
2.2.2 设计要求	18
2.3 载荷	19
2.3.1 常规载荷	19

2.3.2	垂向加速度	20
2.3.3	砰击压力	20
2.3.4	静水压力载荷	21
2.3.5	总强度载荷	22
2.4	船体结构的成型制备	22
2.5	结构分析	24
2.5.1	理论分析模型	24
2.5.2	指标要求	26
2.6	工程应用建议	27
2.6.1	生产特点	27
2.6.2	建造成本	27
2.6.3	相关标准	28
2.7	结论	29
	参考文献	29
第3章	胶黏剂	30
3.1	引言	30
3.1.1	树脂黏结特性	30
3.1.2	对胶接过程的影响因素	31
3.1.3	胶黏剂的优缺点	32
3.2	设计考虑因素	33
3.2.1	不同类型载荷影响	33
3.2.2	接头几何形状设计	34
3.3	胶黏剂的选择	35
3.3.1	胶黏剂/黏结体兼容性	35
3.3.2	力学性能	36
3.3.3	热力学性能	38
3.3.4	海洋环境下的耐久性	39
3.3.5	选择标准	40
3.4	胶接工艺	41
3.4.1	表面准备	41
3.4.2	树脂调配、定位和固化	41
3.4.3	质量认证	42
3.5	应用场合	42
	参考文献	43

第 4 章 连接及其附属结构实用设计	44
4.1 背景	44
4.1.1 连接设计必要性	44
4.1.2 连接设计要求	44
4.1.3 连接形式分类	45
4.1.4 胶接与螺栓连接	46
4.2 面内搭接或对接	47
4.2.1 连接特点和目的	47
4.2.2 主要设计参量	48
4.2.3 螺栓连接建模技术	50
4.2.4 胶接理论模型	52
4.3 面外连接 I: 骨架-壳板连接	54
4.3.1 连接类型	54
4.3.2 设计参量	55
4.3.3 建模技术	55
4.4 面外连接 II: 舱壁与外壳板连接	57
4.4.1 载荷传递特点	57
4.4.2 失效模式	57
4.4.3 设计参量	58
4.4.4 建模分析技术	58
4.5 筋材交叉连接	59
4.5.1 目的	59
4.5.2 设计特点	60
4.5.3 建模分析	60
4.5.4 生产特点	61
参考文献	61
第 5 章 单壳结构船体生产制造	64
5.1 概述	64
5.2 建造过程的含义	64
5.3 场所布局	65
5.3.1 概述	65
5.3.2 厂房面积需求	65
5.3.3 生产周期规划	66
5.3.4 原材料储存	68
5.4 结构制备与装配船台	69

5.4.1	总体布局	69
5.4.2	船体结构模具	69
5.4.3	材料铺设及固化成型	71
5.4.4	生产效率	74
5.4.5	场所通风及安全性	74
5.5	板架制备车间	75
5.5.1	场所布局	75
5.5.2	制板模具	76
5.5.3	材料铺设及固化	76
5.5.4	生产效率	77
5.5.5	场所通风及安全性	77
5.6	部件装配车间	77
5.6.1	场所布局	77
5.6.2	总装前准备工序	78
5.6.3	结构部件组装	79
5.6.4	装配技术	80
5.7	下水后的舾装工作	80
5.8	原材料处理	80
5.8.1	树脂体系	80
5.8.2	芯材和增强纤维	81
5.8.3	清洗剂	82
5.9	质量保证措施	82
5.9.1	员工培训	82
5.9.2	原材料检查	82
5.9.3	生产车间维护	83
第6章	夹层结构游艇船体建造	84
6.1	概述	84
6.2	生产场所设计	84
6.2.1	基于计算机集成制造生产模式	84
6.2.2	先进复合材料需求	84
6.3	平板生产车间	86
6.3.1	生产流程	86
6.3.2	车间内成型	87
6.4	多轴加工机械或数控车间	87
6.5	模具车间	88

6.5.1	原材料	88
6.5.2	模具制造	89
6.6	层压车间	89
6.6.1	原材料	89
6.6.2	生产过程	93
6.7	固化要求	95
6.8	总装车间	96
6.9	下水前装备配置	97
6.10	质量保证	97
第7章	复合材料结构的失效与修复	98
7.1	概述	98
7.2	凝胶涂层(胶衣)失效	98
7.2.1	常见缺陷	98
7.2.2	凝胶背衬	102
7.3	凝胶涂层气泡形成机理	103
7.3.1	概述	103
7.3.2	影响气泡形成的因素	103
7.3.3	减少气泡的措施	104
7.3.4	水汽缩聚试验	104
7.4	层合板设计预防失效措施	105
7.4.1	铺层设计	105
7.4.2	标准复合材料	107
7.4.3	先进复合材料	108
7.4.4	避免层合板失效的常用措施	108
7.5	夹层结构芯材	110
7.6	主船体结构设计中的防失效措施	111
7.6.1	概述	111
7.6.2	避免主船体结构失效的常见措施	111
7.7	展望	113
	参考文献	113
第8章	砰击与撞击载荷作用下夹层结构响应特征	114
8.1	概述	114
8.2	砰击载荷	115
8.3	砰击载荷作用下夹层板的响应特征	117
8.4	材料性能和测试方法	119

8.5	单次和反复砰击对泡沫芯材的影响	121
8.6	固体物的撞击	123
	参考文献	124
第9章	疲劳特性	125
9.1	概述	125
9.2	金属材料疲劳机理	126
9.3	复合材料疲劳机理	128
9.3.1	增强纤维	128
9.3.2	树脂基体	128
9.3.3	界面相	129
9.3.4	层合板	129
9.4	疲劳试验分析	132
9.4.1	树脂基体的影响	132
9.4.2	增强纤维材料的影响	133
9.4.3	织物构型的影响	134
9.4.4	其他影响因素	134
9.5	疲劳设计及损伤准则	136
9.6	结构疲劳	137
9.7	结论	138
	参考文献	139
第10章	复合材料在海洋工程结构中的应用	141
10.1	背景	141
10.2	材料选型	142
10.2.1	增强纤维	142
10.2.2	树脂基体	144
10.3	制作流程和产品	146
10.3.1	板件的制作	146
10.3.2	型材和板架的挤压成型	147
10.3.3	FRP 管件	148
10.4	复合材料结构的耐火特性	150
10.4.1	耐火性特点	150
10.4.2	耐火特性影响因素	154
10.4.3	夹层结构耐火特性	155
10.4.4	双层板材的防火特性	156
10.4.5	双层抗爆防火板设计	158

10.5 结论	159
10.6 致谢	160
参考文献	160
第 11 章 设计监管	162
11.1 适用规范	162
11.1.1 背景:国际海事组织滑艇设计准则	162
11.1.2 船级社规范	163
11.1.3 主船级	163
11.1.4 航行区域限制 R0~R4	164
11.1.5 其他船级注释	165
11.2 高速轻质船舶设计载荷	165
11.2.1 概述	165
11.2.2 垂向加速度	166
11.2.3 局部载荷	167
11.2.4 船体梁总强度计算载荷	170
11.3 玻璃钢结构材料许用要求	172
11.3.1 概述	172
11.3.2 玻璃纤维增强材料	172
11.3.3 聚酯基体材料	172
11.3.4 芯材	173
11.3.5 夹层结构胶黏剂	174
11.4 玻璃钢结构的设计与分析	174
11.4.1 材料性能及测试	174
11.4.2 计算方法和许用应力	175
11.4.3 主船体总纵强度	175
11.4.4 三明治夹层板	175
11.4.5 单筋结构的板和加强筋	178
11.4.6 肋骨框架和梁系	180
11.4.7 细节设计要求	180
11.5 致谢	181
参考文献	181
第 12 章 产品质量与安全	183
12.1 概述	183
12.2 质量保证基本要求	183
12.2.1 名词定义	183

12.2.2	ISO 标准	183
12.2.3	质量保证体系	186
12.2.4	当事人	186
12.2.5	合格证书	186
12.2.6	适用规范	186
12.3	设计阶段	187
12.3.1	两种主要设计途径	187
12.3.2	FRP 与金属材料的差异性	187
12.4	制造阶段	189
12.4.1	火灾/爆炸及健康危害	189
12.4.2	产品生产要求	191
12.5	安装(仅针对 FRP 管路)	196
12.5.1	背景介绍	196
12.5.2	规范要求	196
12.6	服役期检查与维护修理	196
12.6.1	规范要求	196
12.6.2	调查和修复标准	197
第 13 章	设计管理与组织	198
13.1	引言	198
13.2	管理工作的必要性	198
13.3	企业级设计管理	199
13.4	项目级设计管理	199
13.5	FRP 产品的设计管理	200
13.5.1	设计过程	200
13.5.2	设计参数	203
13.5.3	设计流程	204
13.6	生产与设计接口	205
13.7	设计质量保证	206
13.8	组织	206
13.9	设计管理和组织工程案例	206
13.10	结论	208
	参考文献	208
附录	复合材料组分力学性能	209

第 1 章 排水型船舶设计

1.1 引 言

1.1.1 背景

本章主要讨论复合材料在猎扫雷舰艇(mine countermeasures vessels, MCMVs)等排水型船舶结构建造中的应用。猎扫雷舰艇是目前完全采用 FRP 建造的最大尺度的排水型船舶。仅在英国,目前已下水或正在建造的 FRP 猎扫雷舰艇就有 3 个级别,共计 19 艘,而世界上最大的 FRP 船舶是美国的 Osprey 级猎扫雷舰,总长 63m、排水量 850t。

当前,复合材料船体结构形式主要包括单壳加筋结构、夹层结构、单壳无筋结构(厚硬壳)或以上三种形式的组合。此外,波形结构被认为是一种可用于未来新型 MCMVs 的结构形式。

1.1.2 复合材料船舶结构的优异性

在过去的 25 年里,玻璃纤维增强树脂基复合材料(GFRP)几乎已经完全取代木材,成为建造 45~60m 长 MCMVs 的首选结构材料。究其原因,除 GFRP 具有良好的力学性能外,更主要是因为它还具有其他众多的优异特性。以 MCMVs 为例,相对于钢材和木材,复合材料具有以下优点,能更好地满足此类特殊船舶的设计需求:

- (1) 良好的绝缘性能。
- (2) 无磁。
- (3) 相对于木质船体,在维修和建造方面具有更好的经济性。
- (4) 相对于木质船体,具有更好的坚固性和抗爆抗冲击能力。
- (5) 在海洋环境中,具有良好的耐腐蚀和防腐烂特性。

目前,在常规船舶的建造中,低碳钢可能仍然是最可行的首选对象。相对于钢材,复合材料的一个主要优势是可减轻结构重量。虽然减轻结构重量对于任何海洋结构物都是有益的,但是这一要求对于排水型船舶的意义并没有那么显著。因此,除 MCMVs 这类对材料有特殊要求的水面船舶以外,复合材料在其他船舶上应用的首选是上层建筑和桅杆,以达到“减轻上部重量,提高船舶稳性”的目的。