



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“ 十二五 ” 国家重点图书
船舶与海洋出版工程 · 航母与潜艇系列

舰船复合材料

(第二版)

(美) Eirc Greene Associates 著
赵成璧 唐友宏 译



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“十二五”国家重点图书

船舶与海洋出版工程·航母与潜艇系列

总主编 潘镜芙

舰船复合材料

(美) Eric Greene Associates 著

赵成璧 唐友宏 译

上海交通大学出版社

内 容 提 要

先进复合材料是性能优异的可大幅度减重的结构材料,又兼有高耐腐蚀的特点,因此在舰船结构上有广泛的应用前景。本书详细介绍了复合材料的性能、优缺点、设计、应用以及制造技术等方面的内容。同时举例介绍了美国等多个技术先进国家舰船复合材料的应用和在设计、实际建造等方面的最新成果。

图书在版编目(CIP)数据

舰船复合材料/(美) Eric Greene Associates 著;
赵成璧,唐友宏译. —上海:上海交通大学出版社, 2012
(船舶与海洋出版工程·航母与潜艇系列)
ISBN 978-7-313-07829-2

I. ①舰… II. ①E… ②赵… ③唐… III. ①船用材料: 复合材料—研究 IV. ①U668

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 217568 号

舰船复合材料

(美) Eric Greene Associates 著
赵成璧 唐友宏 译

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 951 号 邮政编码 200030)

电话: 64071208 出版人: 韩建民

浙江云广印业有限公司印刷 全国新华书店经销

开本: 787 mm×1 092 mm 1/16 印张: 25.75 字数: 498 千字

2013 年 1 月第 1 版 2013 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-313-07829-2/U 定价: 65.00 元

版权所有 侵权必究

告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系
联系电话: 0573-86577317

序

简介

使用复合材料建造船舶时,必须提供一种评估船舶结构安全的基本设计工具。随着材料和建造技术的进步,考虑使用复合材料建造长达 100 m(约 330 ft)的船舶是合理的。尽管船舶结构的设计原理以及用于航空结构的复合材料都很成熟,但是将两种技术融合在一起的工艺才刚刚起步。《舰船复合材料(第二版)》探究了先进工程复合材料用于大型船舶结构的所需技术。与《舰船复合材料(第一版)》一样,该版陈述了应用、材料、设计、性能和制造等方面的内容。

该版《舰船复合材料》是船舶结构委员会(SSC)SSC-360 和 SSC-403 报告的结果。美国海军水面作战中心 Carderock 分部对本书中应用和制造部分的更新也给予了资助。作者对建造商给予的材料和复合材料制造过程调查的积极反馈表示感激。在本书编写过程中,那些供职于 SSC 项目技术委员会的人员提供了宝贵的资料,特别是 Dr. Gene Camponeschi, Dr. Robert Sielski, Loc Nguyen, Dave Heller, Bill Lind, George Wilhelmi, Chuck Rollhauser 和 Ed Kadala,基于他们的经验对船舶复合结构的设计提供了见解。Structural Composites 公司的 Art Wolfe 和 Dr. Ron Reichard, ATC Chemical 的 Tom Johannsen 以及 Martech 的 Ken Raybould 对数据以及测试也贡献良多。

背景

复合材料的概念起源于最初的泥土和稻草组成的小屋。在世纪之交,现代复合材料出现了酚醛树脂基体。二次世界大战后,开始使用玻璃纤维建造船舶。战后不久,基于减少维护和降低生产成本的考虑,美国海军建造了一系列的 28 ft 的小艇。

在 1960 年代,玻璃纤维船舶建造随着私用船舶的快速增长而蓬勃发展。低成本的船体以及实际上无需维护的巨大吸引在美国产生了这类复合材料船

舶建造商。早期纤维增强材料的船舶建造商依靠“建造和测试”或经验方法来确保他们制造的船壳具有足够的强度。由于玻璃纤维是相对比较新的船舶建造材料,设计者在材料数量的使用上倾向于保守。

1960年,Owens-Corning 玻璃纤维公司赞助海洋结构制造商 Gibbs & Cox 出版了 *Marine Design Manual for Fiberglass Reinforced Plastics*。该书由 McGraw-Hill 出版,是第一本直接面向造船工业的玻璃纤维设计指导书籍,详述了设计和建造方法以及以表格形式给出了通用材料的层合性能数据。这本书对那时流行的材料和建造技术特别有指导意义。

由于航空工业使用复合材料作为框架结构,由分析技术发展到了设计领域。航空复合材料的关键特性确保了所提供的层合板的分析和测试水平。不足的是,航空层合板通常包含碳纤维和环氧树脂,由增强预浸料树脂在压热炉中固化。成本和部件尺寸的限制使得这些系统对于建造船舶主要结构不太实际,并且机身荷载也和那些船舶结构中的不一样。但是最近这两个工业正在相互靠近。高端船舶建造更多地使用预浸料,而机身建造商也在寻找更经济有效的建造方法。

《舰船复合材料》试图成为在船用复合材料工业,一个不断变化的方向中,材料、设计和建造实践的新技术指南。设计者在时间允许的情况下,应该多收集技术和实践的信息。最近的一些特别会议和课程是设计指导资料的有用来源。复合材料导向的会议,如由塑料工业协会(SPI)和材料加工和工程进展协会(SAMPE),最近几年已经有一些船舶工业的文章在年会上出现。船舶设计协会,如海洋结构物及船舶工程师协会(SANME)以及美洲海洋工程师协会(ASNE),也在他们的会议或论文集中提到复合材料建造的问题。实际上,1993年秋天,ASNE在 Savannah 召开的会议集中于这个方向。1990年9月,由国家科研委员会主持、船舶结构委员会资助召开了“复合材料在荷载船舶结构中的应用”的会议。SNAME有一个十分活跃的技术委员会 HS-9 也涉及复合材料。位于 Molbourne, Florida 的复合材料教育协会每两年举办一次“复合材料在船舶中的应用”(MACM)的会议。该会议已经举办了5届,产生了很多具有船用复合材料工业特色的技术报告。

Gibbs & Cox 的 Robert J. Scott 基于 1973 年由 John DeGraff 发表的 *Fiberglass Boat Design and Construction* 一书,作为密歇根大学授课的课堂讲义。可以通过 SNAME 获得该书的更新版本。1990年,船舶结构委员会发布了由该书作者发表的 *SSC-360 Use of Fiber Reinforced Plastics in the*

Marine Industry。这个报告在 20 世纪 80 年代末作为材料和建造实践的纲要。在英国, Elsevier Science Publisher 发表了已故 C. S. Smith 的著作 *Design of Marine Structures in Composite Materials*。该书总结了 Smith 在英国国防部一生的工作: 帽状加强材增强复合板的处理。

相关的信息也可以在专业杂志中零星找到, 如 SNAME, ASNE, 复合材料建造者协会(CFA), SAMPE 和工业界的出版物, 如复合材料技术、复合材料设计与应用以及增强塑料。由位于 Brooklin, ME 的 Wooden Boat Publications, Inc 发表的“Professional Boatbuilder”, 重点讨论船用复合材料领域的技术问题。

Eric Greene

前言

具有悠久历史的中国正处于快速发展时期,作为“古老工艺技术”遗产代表的船舶行业亦是如此。由于较低的劳动力成本、材料费用以及有机会寻找到比其他地区价格更低的商品的优点,在中国的制造成本很可能比在其他地区低。整体而言,中国的复合材料市场是巨大的,而船舶领域正是处于这样的环境之中。许多拥有新一代技术的船用材料供应厂商正在不断进驻中国市场,如多轴向织物制造商、环氧树脂制造商和芯层材制造商。更重要的是,中国复合材料船舶制造商学习和尝试新技术的热情和意愿可能是世界上其他地区的复合材料船舶制造商无法比拟的。许多使用复合材料建造船舶的工厂认识到他们目前的水平与必须要具备的国际竞争力之间存在着差距,因而他们正在迅速赶超。如太阳鸟游艇制造有限公司改进真空辅助成型工艺来制造 62 ft 机动游艇的艇体;上海红双喜游艇有限公司采用真空袋成型夹芯结构,并顺利承担建造了一批由 Dubois 设计的 68 ft 帆船,用于参加 Clipper 环球帆船赛;上海 Five Star Marine 公司采用同样的技术制造了多艘用于斯堪的纳维亚(Scandinavia)市场的客运机动艇;而杭州的飞鹰船艇有限公司是世界上最大的碳纤维划艇制造商之一。著名的澳大利亚船艇制造商 McConaghy 已经与香港 Jinli Composites 公司成立了一家合资企业,开始建造中国的第一艘美洲杯(America's Cup)级游艇。虽然从总体来看,中国的复合材料船舶制造工业尚落后于当今的国际标准,但在许多方面已经取得了快速的技术进步,而且通过新的设计和适当的协助,它必将成为世界级的竞争对手。

《舰船复合材料(第二版)》由美国 Eric Greene Association Inc. 出版,是探究先进工程复合材料用于大型船舶结构所需技术的专业书籍。该书陈述了船用复合材料的应用、设计、性能和制造等方面的内容,并试图成为船用复合材料,这个不断变化的方向中,对材料、设计和实际建造的最新指南。

该书适合于使用纤维增强复合材料建造船舶及海洋结构物,以及运输工

业、纤维增强复合材料工业、航空航天工业中使用复合材料的设计及建造人员阅读。同时,它也是高等院校以及高级技工学校从事复合材料专业(特别是纤维增强复合材料专业)的专科、本科、研究生及科研人员不可多得的资料。该书也可作为船用复合材料专业的教科书和重要的参考书籍。

本书译者,华南理工大学土木与交通学院船舶与海洋工程系唐友宏和赵成璧,结合本人在先进复合材料和船舶及海洋结构物设计与制造方面的专业背景知识及实践经验将该英文版书籍译为中文版,供相关读者在科研和实践中使用。在该书的翻译过程中得到了华南理工大学材料学院方立明博士,土木与交通学院船舶及海洋工程系研究生刘凌飞、李军、吴南活和张薇的大力协助和支持。同时,译者感谢英文版原著作者 Eric Greene 无偿授权译者翻译及出版该书的中文版,上海交通大学出版社对该书出版的支持。最后,译者感谢他们的家人,在该书出版过程中给予的支持、理解和帮助。

由于时间仓促以及作者水平有限,书中的缺点和错误,期望读者批评与指正。

唐友宏

赵成璧

华南理工大学船舶与海洋工程系

广东省船舶与海洋工程技术研究开发中心

广州现代产业技术研究院

2012年2月

目 录

第 1 章 应用	001
1.1 娱乐性海洋产业	001
1.2 商业性海洋产业	012
1.2.1 公务船	012
1.2.2 客运渡轮	013
1.2.3 商船建造	015
1.2.4 商用深潜器	016
1.2.5 航海辅助设备	017
1.2.6 近海工程	017
1.2.7 渔业	021
1.2.8 救生艇	024
1.3 海军用复合材料的应用和研发	025
1.3.1 潜艇	025
1.3.2 水面舰艇	028
1.4 运输工业	043
1.4.1 汽车工业中的应用	043
1.4.2 公共交通	047
1.4.3 货物装卸	048
1.5 工程上的应用	050
1.5.1 管道系统	050
1.5.2 纤维增强塑料管道的应用	052
1.5.3 水箱	054
1.5.4 空气调节设备	055
1.5.5 商用梯子	055

1.5.6 天线塔	056
1.5.7 传动轴	057
1.5.8 桥梁结构	057
1.6 航天航空复合材料	058
1.6.1 商业和商用	059
1.6.2 军事飞机	059
1.6.3 直升机	061
1.6.4 实验	062
第2章 复合材料	063
2.1 复合材料	063
2.1.1 增强材料	064
2.1.2 增强材料的构造	067
2.1.3 树脂	070
2.1.4 芯层材料	073
2.2 复合材料概念	077
2.2.1 增强材料和基体性能	077
2.2.2 方向特性	078
2.2.3 设计及与金属结构的性能比较	079
2.2.4 材料特性和设计许可值	082
2.2.5 成本和制造	083
第3章 设计	087
3.1 船体纵向梁	087
3.2 抨击	090
3.3 船体梁应力分布	096
3.4 其他船体和甲板荷载	099
3.4.1 船侧结构、干舷和露天甲板	099
3.4.2 甲板室和上层建筑	100
3.4.3 隔舱进水	100
3.4.4 设备和货物荷载	101
3.5 复合材料力学	101
3.5.1 微观力学理论	101

3.5.2 层合板理论	108
3.6 失效准则	113
3.7 层合板测试	114
3.8 宏观力学	126
3.8.1 梁	127
3.8.2 面板	128
3.8.3 无加强筋、单层面板	128
3.8.4 夹层板	135
3.9 横骨架板的失稳	164
3.10 节点和细节处	167
3.10.1 二次连接	167
3.10.2 船体到甲板的连接	168
3.10.3 舱壁附件	170
3.10.4 纵材	171
3.11 应力集中	174
3.11.1 拖运和储存中的应力	175
3.11.2 发动机座	175
3.11.3 部件	175
3.12 夹层板试验	178
3.12.1 背景	178
3.12.2 压力台设计	178
3.12.3 试验结果	179
3.12.4 结构板架系统试验	180
3.12.5 Hydromat 试验系统	180
第4章 性能	182
4.1 疲劳	182
4.1.1 复合材料疲劳理论	184
4.1.2 疲劳测试的数据	185
4.2 冲击	187
4.2.1 冲击设计的考虑因素	188
4.2.2 理论发展	190
4.3 分层	191

4.4 吸水性	193
4.5 起泡	197
4.6 历史案例	201
4.6.1 美国海岸警卫队 40 ft 巡逻艇	201
4.6.2 潜艇的流线装置	202
4.6.3 胶衣层开裂	203
4.6.4 夹层结构的芯层分离	205
4.6.5 二次连接的破坏	206
4.6.6 紫外线曝光	206
4.7 温度的影响	207
4.8 破坏模式	208
4.8.1 拉伸破坏	209
4.8.2 压缩破坏	211
4.8.3 弯曲破坏	213
4.8.4 首层破坏	216
4.8.5 蠕变	217
4.9 防火性能	220
4.9.1 小规模试验	220
4.9.2 中等规模试验	227
4.9.3 大规模试验	232
4.9.4 MIL-STD-2031(SH)要求的概括	232
4.9.5 SOLAS 对结构化材料在防火方面的要求	234
4.9.6 海军水面舰艇的火险情况	236
4.9.7 国际海事组织(IMO)试验	238
4.9.8 船用复合材料的热-机械性能	240
第5章 制造工艺	246
5.1 制造过程	246
5.1.1 模具制造	246
5.1.2 单壳建造	249
5.1.3 凹模建造芯层结构	249
5.1.4 凸胎模建造芯层结构	250
5.1.5 生产效率	253

5.1.6 设备	254
5.1.7 未来趋势	266
5.2 维修	274
5.2.1 单壳结构维修	275
5.2.2 夹层结构的主要损伤	291
5.2.3 小的非贯通孔	292
5.2.4 起泡	292
5.3 质量保证	293
5.3.1 材料	295
5.3.2 过程中的质量控制	298
第6章 参考文献	301
6.1 规章制度	301
6.1.1 美国海岸警卫队	301
6.1.2 美国船级社	307
6.2 转换因数	310
6.3 词汇表	314
6.4 参考文献	334
6.5 附录: 船用层合板测试数据	349
索引	391

第 1 章 应 用



1.1 娱乐性海洋产业

游艇制造业已经拥有超过 30 年的纤维增强塑料(Fiber Reinforced Polymer, FRP)船建造经验,纤维增强塑料能形成复杂的构造和无缝的船体是推动纤维增强塑料船舶发展的因素。纤维增强塑料由于重量轻、振动阻尼大、耐腐蚀、抗冲击、建造费用低、易于建造和维修保养,已经在游艇制造业中得到了广泛的应用。

从 20 世纪 60 年代中期起,游艇基本上采用玻璃钢结构。经过大约 20 年的发展,游艇制造业者获得了用最少数量的装配部件大量生产易于维护的船体的机会。早期纤维增强塑料结构的设计工作主要依靠不断的试验,从失败中寻找解决问题的办法,这使得最初的建造会有较高的损耗率。现在推动船舶复合材料制造技术发展的是赛艇(动力艇和帆船)。

动力艇和帆船不仅要求赛艇制造者通过减轻重量获得最佳结构性能,而且使得赛艇相对于常见的非竞赛船舶需要有更高的承载能力和更长的补给周期。赛艇和其他推动本行业发展的公司说明了这一切。还有许多公司也在该领域默默无闻地做着创造性的工作。

竞赛动力赛艇

动力赛艇的制造者采用先进复合材料以提高船舶性能和驾驶员安全性。Bennington, VT Fothergill 复合材料公司已经为赛艇驾驶员设计、测试和制造了一种安全驾驶舱。这种安全驾驶舱是用碳纤维、芳族聚酰胺纤维和芳族聚酰胺制造的蜂窝夹层结构组成的。这种结构经过 100 ft(1 英尺=0.3048 米)高的跌落测试而没有明显的损坏。在 Sacramento 大奖赛中,赛艇安全驾驶舱中的 3 个驾驶员在事故中虽然受伤但幸存了下来^[1-1]。

Ron Jones Marine

位于 Kent, WA 的 Ron Jones marine 制造在专业循环赛上用于竞赛的高技术

水上滑艇。Sr. Ron Jones 从 1955 年就一直制造竞赛用水上滑艇。自 1970 年后,开始使用复合材料进行建造。如今,Ron 和他的儿子使用预浸料加固材料和蜂窝夹层材料制造专业的水上滑艇。在 Jones 的工厂中,已经建造了超过 350 艘该类船舶。

Ron Jones marine 致力于在那些比赛中速度超过每小时 200 mile(1 英里 = 1.609 千米)水上滑艇驾驶者的安全性上进行创新。为了控制船艇在高速行驶中的稳定性,Jones 使用低成本的片状金属模具制作了一个串联机翼扰流器。他们还开发了安装在翼梢浮筒上的防滑鳍,先进的水动力翼梢浮筒和钝艏^[1-2]。

对驾驶员安全起主要作用的是由 Ron Jones marine 开发的安全驾驶舱,驾驶舱还被当作更新改造的配套装备出售。图 1-1 展示了一种典型的安全驾驶舱和竞赛用水上滑艇。这种安全驾驶舱的特点是有大量的多面聚碳酸酯窗户,可以提供 270°的视野,并在底部装备了紧急逃生舱盖。

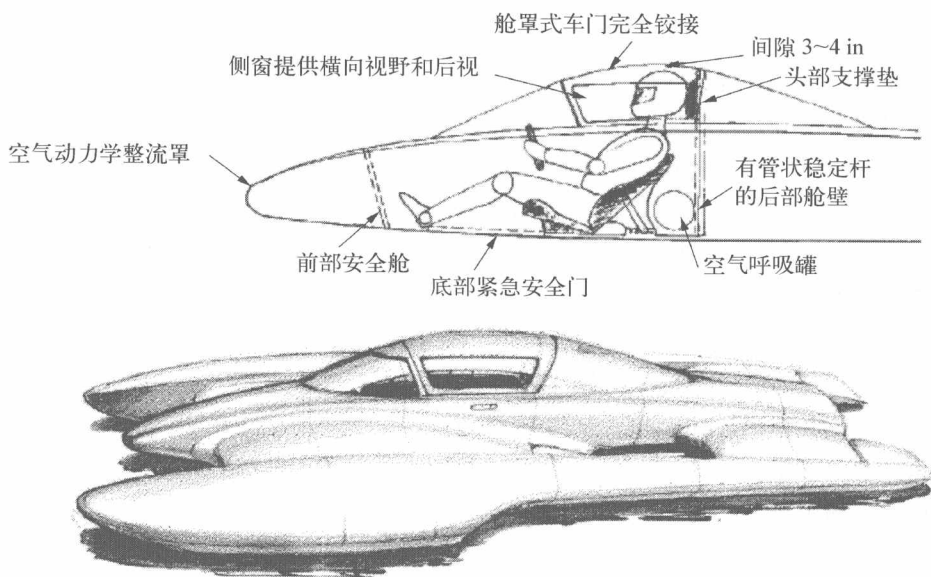


图 1-1 Ron Jones marine 制造的安全封闭式驾驶舱以及由预浸料材料制造的高速水上滑艇的示意图

竞赛帆船

在 20 世纪 70~80 年代,美国船级社(ABS)重新制订了竞赛帆船的规范,虽然该规范已经被废除,但设计者继续使用“ABS 近海竞赛帆船的制造和入级指南”^[1-3]来进行结构研发。新美洲杯入级规则中详述了一种快速单体、单桅纵帆船的模型,它具有新颖、重量轻,并具有 IOR Maxi 船舶和超小排水量船(ULDB)间的某些特征^[1-4]。图 1-2 展示了 1988 年末由 Pedrick 帆船设计公司研发的初步设计

方案。这些船的性能对重量非常敏感,因此有一个附加的结构优化费用。该规则对结构部分采用一种薄的夹层外壳,要求具有最小外壳和夹层厚度以及密度,同时要求最大夹层厚度、纤维密度以及高的固化温度。表 1-1 总结了美洲杯入级规则中层合材料的设计规则。

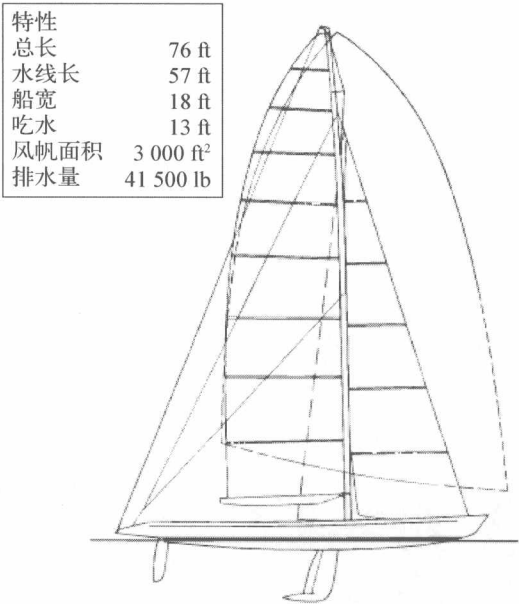


图 1-2 由 Pedrick 帆船设计公司研发的
美洲杯级帆船初步设计方案

表 1-1 美洲杯入级规则中层合材料的设计要求^[1-6]

项 目	激光开槽平面以下 船舳部的前部	其余的船体	甲板和驾驶舱	单 位
最小外壳重量	0.594	0.471	0.389	lb/ft ²
最小内壳重量	0.369	0.287	0.287	
最小夹层重量	0.430	0.348	0.123	
最小总重量	1.393	1.106	0.799	
最小壳重量	2.253	1.638	1.024	
最小外壳厚度	0.083	0.067	0.056	in
最小内壳厚度	0.052	0.040	0.032	
最小夹层厚度	1.151	1.151	0.556	
最大夹层厚度	2.025	2.025	1.429	

续 表

项 目	激光开槽平面以下 船舳部的前部	其余的船体	甲板和驾驶舱	单 位
最小夹层密度	4.495	3.559	2.684	lb/ft ³
最小外壳密度	84.47	86.22	84.72	
最小内壳密度	87.40	86.47	109.25	
最大纤维模数	34×10 ⁶			lb/in ²
最大固化温度	203			°F
最大固化压力	0.95			atm

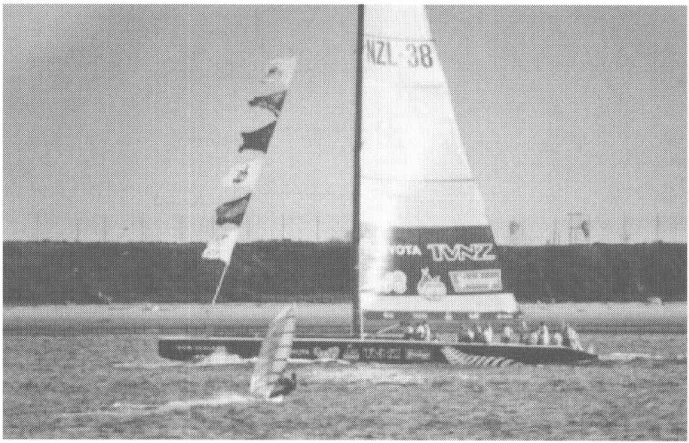


图 1-3 1995 年美洲杯冠军新西兰【Eric Greene Associates】

为了向读者展示船舶工业进步的过程，这里列出了几类率先采用新型结构的船舶和各种各样的生产技术。

帆板 (Sunfish)

长期以来，帆板使得许多航海者加入了这项运动。简单的桅杆和像平板一样的船体使得这种船很适合放在车的顶部去海边。从 1952 年开始，Alcort 已经生产了 250 000 艘帆板。基本上，两块构件拼成的尖舭船体就可以保证帆板的结构强度。

Boston Whaler

Boston Whaler 在 20 世纪 60 年代早期便开始建造一系列的舷外汽艇。他们从 1960 年开始就生产 13 ft 的三体船，目前他们已经生产了超过 70 000 艘该型船舶。该船的最大特点是船体不会沉没，其船体结构是厚的泡沫夹层结构构成的。在大型钢制模具中，在注入膨胀性聚氨酯泡沫前，船体和甲板部件被喷上邻聚酯树