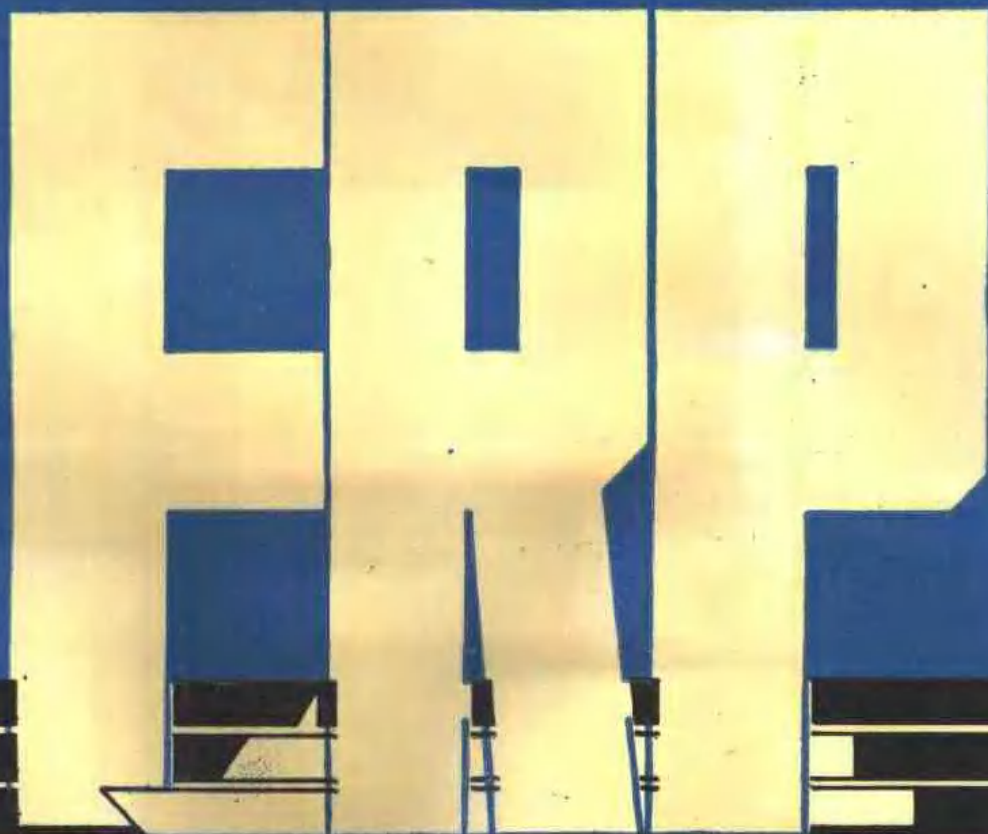


玻璃钢船舶文集

第一辑



934-55

(1)

船舶工业总公司 第七〇八研究所
第七研究院

玻璃钢船舶文集

第一辑

船舶工业总公司
第七〇八研究院
第七研究院

上海市新闻出版局
内部资料准印证(93)第 139 号

编辑出版:第七〇八研究所
通讯地址:上海市新肇周路 1340 号情报室
邮政编码:200011
常熟市白云印刷厂印刷 内部资料

前 言

近年来纤维增强复合材料在舰船中的应用日趋广泛,特别是在反水雷舰艇和高性能船舶等领域中卓有成效的应用业已显示出这类新颖结构材料的优越性和强大的生命力。功能结构材料在舰船结构中的应用,代表了舰船高新技术的一个发展方向。为配合《舰船用玻璃钢应用研究》课题工作的开展,我们结合科研工作的需要,从最近几年的国外期刊和专题文献中选取了 15 篇文章,编译成这本《玻璃钢船文集》。

本文集收集了国外纤维增强塑料(主要是玻璃纤维增强塑料,即玻璃钢)舰船中有关艇体材料、结构设计、建造方法、成型工艺、质量控制、船厂设施以及检验与试验等方面的最新技术资料,以供从事纤维增强塑料舰船的教学、科研、设计、生产、检验和营运工作的专业人员作参考。

在本文集的选题、翻译、校审和出版过程中,得到了中国船舶及海洋工程设计研究院、洛阳船舶材料研究所、上海船舶工艺研究所以及船舶总公司综合技术经济研究院等单位的鼎力协助,谨在此致谢。同时对一直关心和支持本课题研究工作的船舶总公司科技局李培昌处长亦表示深切的谢意。

本文集由曹明法高工主编,林廷旭、张世荣和蒋金英高工为副主编,游统生高工任责任编辑,任栋同志为编辑。全文译校完毕后由曹明法高工总校定稿。由于时间仓促以及编译者的水平所限,本文集的选题可能会挂一漏万,至于译校中的差错更是在所难免,恳请读者不吝指正。

《舰船用玻璃钢应用研究》课题组

1993 年 8 月

目 次

1. 纤维增强塑料(FRP)的原材料	(1)
2. 舰船结构用玻璃钢(GRP)复合材料的选择	(14)
3. 海上运载工具用复合材料的易燃性和毒性	(19)
4. 先进复合材料的强度评价	(29)
5. 建造民用船艇的高性能复合材料	(39)
6. 纤维增强塑料(FRP)的试验	(47)
7. 纤维增强塑料(FRP)船的设计	(64)
8. 玻璃钢(GRP)夹层结构船体的设计与建造	(90)
9. 纵向波形船体的结构设计	(97)
10. 美国海军的沿海猎雷艇(MHC):设计、材料和建造设施	(107)
11. 纤维增强塑料(FRP)船的建造工艺	(118)
12. Vosper Thornycroft 公司的玻璃钢(GRP)船建造	(121)
13. 纤维增强塑料(FRP)船的建造法(■)——渔船	(124)
14. 复合材料船体和上层建筑所用的大型生产设备	(132)
15. 纤维增强塑料(FRP)船的检验	(140)

纤维增强塑料(FRP)的原材料

1. 增强材料

1.1 玻璃纤维

玻璃纤维因其生产成本低廉,并具有相当良好的强度/重量比特性,以及良好的耐化学性和可加工性,故而在增强塑料所用的各种纤维中独占90%以上。然而,业已表明,在长期加载时,其优异的抗拉强度下降^[1]。通过将熔化的玻璃挤压成直径在5~25微米之间的长丝,使形成连续玻璃纤维。表1列出在纤维增强塑料(FRP)工业中常用的一些纤维直径的标记符号。

表1 玻璃纤维直径的标记符号

标记符号	密耳	微米(10^{-6} 米)
C	0.18	4.57
D	0.23	5.84
DE	0.25	6.35
E	0.28	7.11
G	0.38	9.65
H	0.42	10.57
K	0.53	13.46

玻璃长丝逐根涂以浸润剂以减少磨损,然后结合成由102或204根长丝组成的单股丝。浸润剂在树脂浸渍过程中起偶联剂作用。表2列出了一些典型的玻璃纤维处理剂及其可相容的树脂系统。E玻璃(钙基硼硅酸铝)因其良好的强度性能和耐水降质性而成为船用层合板中最常用的增强纤维。S玻璃(二氧化硅、氧化铝和氧化镁)的抗拉强度比前者高约1/3,而且一般有较高的疲劳抗力。这类玻璃纤维的价格约为E玻纤的3~4倍。表3列出E玻璃和S玻璃的成分(重量%)。表4列

出E玻纤和S玻纤原料的性能数据。

表2 典型的玻璃处理剂

牌号	处理剂类型	树脂系统
114	甲基丙烯酸酯氯化铬	环氧
161	软、透明,有良好的浸润性	聚酯
volan	甲基丙烯酸酯氯化铬	聚酯或环氧
504	加0.03%~0.06%铬的volan(沃兰)处理剂	聚酯或环氧
504A	加0.06%~0.07%铬的沃兰处理剂	聚酯或环氧
A-100	氨基硅烷	环氧
538	A-1100氨基硅烷加甘油	环氧
550	改性沃兰	聚酯
558	环氧-功能硅烷	环氧
627	沃兰的硅烷替换物	聚酯或环氧
SP550	专利品	聚酯或环氧
Y-2967	氨基硅烷	环氧
Y-4086/7	环氧改性的甲氧基硅烷	环氧
Z-6040	环氧改性的甲氧基硅烷	环氧
Z-6030	甲基丙烯酸酯硅烷	聚酯
Garan	乙烯基硅烷	环氧
NOL-24	卤硅烷(在二甲苯中)	环氧
S-553	专利品	环氧
S-920	专利品	环氧
S-735	专利品	环氧

表3 E玻璃和S玻璃的玻璃组分(重量)

	E玻璃	S玻璃
二氧化硅	52—56%	64~66%
氧化钙	16—25%	0~3%
氧化铝	12—16%	24—26%
氧化硼	5—10%	—
氧化钠和氧化钾	0—2%	0.3%
氧化镁	0—5%	9—11%
氧化铁	0.05—0.4%	0—0.3%
氧化钛	0—0.8%	—
氟化物	0—1.6%	—

表 4 增强纤维的机械性能

纤维	密度 磅/英寸 ² (kg/m ³)	抗拉强度 磅/英寸 ² ×10 ³ (kgf/cm ² ×10 ³)	拉伸模量 磅/英寸 ² ×10 ⁶ (kgf/cm ² ×10 ⁵)	极限伸长率 %	价格 美元/磅 (\$/kg)
E-玻璃	.094 (2601.9)	500 (35.1)	10.5 (7.4)	4.8	.80~1.20 (1.76~2.65)
S-玻璃	.090 (2491.2)	665 (46.7)	12.6 (8.9)	5.7	4 (8.82)
芳纶-Kevlar [®] 49	.052 (1439.4)	525 (36.9)	18 (12.7)	2.9	16 (35.27)
Spectra [®] 900	.035 (968.8)	375 (26.4)	17 (11.9)	3.5	22 (48.50)
聚酯-COMPET [®]	.049 (1356.3)	150 (10.5)	1.4 (1.0)	22	1.75 (3.86)
碳-PAN	.062~.065 (1716.2~1799.2)	350~700 (24.6~49.2)	33~57 (23.2~40.0)	0.38~2.0	17~450 (37.48~992.08)

1.2 聚合纤维

最普通的芳纶纤维是由杜邦公司开发的 Kevlar。这是主要的有机增强纤维。它的使用可追溯到本世纪 70 年代初,当时将它作为轮胎中钢带的替代品。芳纶纤维的突出特点是重量轻、抗拉强度和拉伸模量高、抗冲击、耐疲劳,并且可以编织。芳纶的压缩性能相对较差,因为它们在低应变值下显示出非线性的延性行为。虽然芳纶纤维耐强酸和强碱,但就如 Kevlar 49 吸水能造成难题一样,紫外线老化也可能造成难题。在给定的相对湿度下,超高模量 Kevlar 149 的吸水量几乎少 2/3。芳纶纤维往往会难于切割并在层压过程中难于浸润。

Allied 公司开发了一种称之为 Spectra 的高强度/模量长链聚乙烯纤维,在 1985 年引入市场。Spectra 的室温比强度优于 Kevlar,尽管在高温下性能下降。其耐化学性和耐磨性数据优于芳纶。表 4 中也列出了 Kevlar 纤维和 Spectra 纤维的数据。

最近已在船舶工业中采用聚酯纤维和尼龙热塑性纤维作为主要的增强纤维,并与玻璃纤维混杂配置。Allied 公司已开发了一种称为 COMPET 的纤维。这种产品是将处理剂涂在 PET 纤维上以增强基体的粘附性能。

Hoechst-Celanese 制造了一种称之为 Trevira 的产品。这是一种经热处理的聚酯纤维织物,被设计用作“增厚”材料及作为减少“印透”(“Print-through”)的胶衣隔离层。虽然聚酯纤维具有相当高的强度,但其刚性却明显低于玻璃纤维。其它有吸引力的特点包括低密度、价格合理、抗冲击和耐疲劳性能良好,以及对于减振和抗起泡的潜在性能。

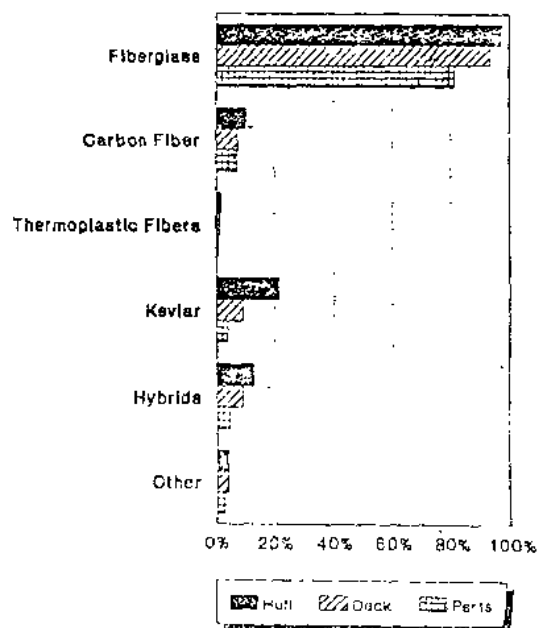


图 1 船舶工业增强材料的用途

1.3 碳纤维

“碳”纤维和“石墨”纤维这两个术语一般可互换使用。虽然在技术上,石墨纤维是指碳组分大于 99% 的纤维。与之相比,PAN 基纤维的碳组分为 93%~95%。

迄今生产的所有连续碳纤维都是由原始的有机化合物制成的。这些有机化合物,除 PAN(聚丙烯腈)外,还包括人造丝和 Pitch-

es。这后两者通常用作低模量纤维。

碳纤维是所有增强纤维中强度和刚性最高的。正如同玻纤和芳纶一样,碳纤维不易发生应力断裂或应力腐蚀。其高温性能尤其突出。PAN 基的主要缺点是其相对价格随高的原始成本和能量密集型制造工艺而变化。表 5 列出纤维的一些对比性能数据。

表 5 增强材料各种形式的说明

形 式	说 明	原 则 工 艺
长丝	初拉纤维	使用前进一步处理
连续纤维	将基本长丝集拢成连续线束	使用前进一步处理
纱	搓捻的纤维(用后处理剂处理)	使用前进一步处理
短切单纤维	切成 1/4~1/2 英寸的单纤维	注塑成型;对模
无捻粗纱	成束的几股纤维,象绳子,但不搓捻	纤维缠绕成型;片状成型;喷射成型;挤拉成型
磨断纤维	将连续纤维锤断成 1/32~1/8 英寸长	配料;注塑;增强反作用注塑成型(RRIM)
增强毡	连续或短切纤维组成的无纺无规则毡	手糊成型;树脂传递成型(RTM);离心注塑
纺织物	由纱纺织的布	手糊成型;预浸渍
无捻粗纱布	织物似的较粗和较重的纺织单纤维	手糊或机械成型;树脂传递成型
加捻粗纱	单根连续纤维本身多次折迭并捻合	使用前进一步处理
非机织织物	类似于毡,但用单向无捻粗纱制成片状	手糊或机械成型;树脂传递成型
表面毡	单长丝的无规则毡	手糊成型;模具成型;挤拉成型

2. 增强材料的结构

增强材料的各种型式与树脂系统相结合而形成结构层合板。制造厂商使用各种型式增强材料的百分比示于图 3。表 5 列出了各种型式增强材料的定义。出于工艺上和经济上的考虑,有些强度较低的非连续结构限于玻璃纤维。

2.1 纺织物

纺织的复合增强材料通常属于布类或无捻粗纱布类。纺织布重量轻,一般为 6~10 盎司/码²(203.46~339.1 g/m²),而达到 1 英寸厚(2.54 cm),需要约 40~50 层。它们在船舶结构中的用途限于小零件及修补。特殊的编织花样包括最高度交织的平织,有成对的经纱和纬纱的网织和交织最小的缎织。缎织的剪切扭曲抗力相应增高(易起皱)。图 2 示

出几种市售编织花样。

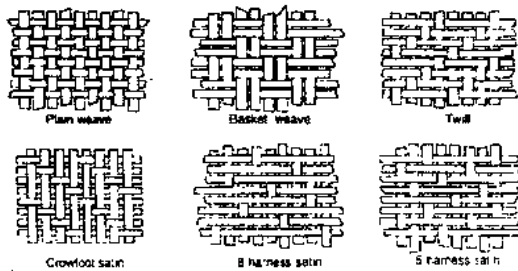


图2 各种型式的增强织物结构

无捻粗纱布增强材料由平织花样中若干束扁平的连续纤维组成,其经线方向的材料略多些。这是大型船舶结构中所用的最普通类型的增强材料,因为这种材料可以以相当重的份量加以利用(最常见的是 24 盎司/码² (813.84 g/m²)),这就使之可以迅速达到所需厚度。此外,使用一种起皱性仍然相当好的材料便可能有方向性的强度性能。因为纤维是连续编织的,故增强了抗冲击能力。

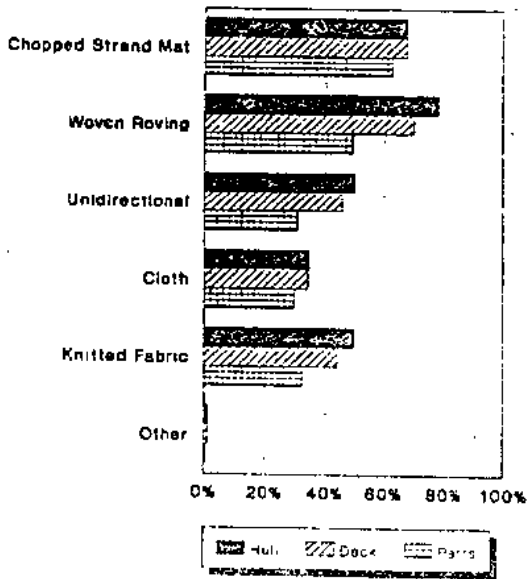


图3 船舶工业用的增强材料型式

2.2 针织品

Knytex 于 1975 年首先引入针织的增强织物,旨在提供比无捻粗纱布更高的单位厚度之强度和刚度。针织增强材料是采用与诸

如聚酯之类的非结构合成纤维织物缝合在一起的单向增强材料组合而构成。在其结构中也可夹入一层毡。与无捻粗纱纤维的皱缩取向相比,这种工艺的优点是使增强纤维平铺。此外,增强物的取向是可沿轴线的任何组合方向的。优异的玻璃/树脂比也可达到,这就使层合板的总价格可与传统材料相竞争。图 4 示出了无捻粗纱布与针织结构之比较。

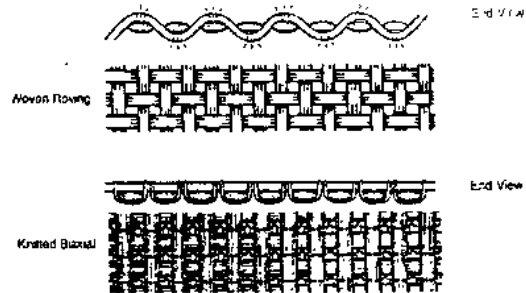


图4 常规无捻粗纱布与双轴向的针织织物之比较,显示出无捻粗纱布中的理论扭结应力

2.3 无定向材料

在手糊成型中铺成预制毡或通过喷射成型法铺成短切纤维毡时,可使用无定向增强材料。短切纤维毡由用可溶性树脂类粘合剂粘合的随意取向的玻璃纤维丝组成。连续纤维毡与短切纤维毡类似,只是前者的纤维是连续的,并以盘绕方式铺成。手糊成型和喷射成型这两种方法制成的各层,沿 X 轴和沿 Y 轴的性能相当,而且具有良好的层间剪切强度。这是形成厚度很经济的方法,尤其是采用复杂模具时。当然,其极限机械性能与连续纤维增强材料并不相等。

2.4 单向增强材料

纯单向结构是指在纬向无结构增强材料。超高强度/模量材料(例如碳纤维)由于其高的价格及用途的特殊性,有时就以该型方式使用。由于难于处理和浸润,故材料宽度往往受限制。Anchor Reinforcements 公司近期介

绍了一系列采用可与热固性树脂系统相兼容的热塑性织物胶粘剂胶接在一起的单向增强材料。该公司声称,该材料比传统的纯单向材料容易处理和切割。单向材料的典型用途包括首柱和中线面加强以及加强筋的顶端。当要求超高性能层合板时,则整个船体都用单向增强材料制造。

3. 树脂

3.1 聚酯

制造厂商使用各种树脂系统的百分比示于图 5。聚酯树脂是最便于使用并显示良好的耐化学性的最简单、最经济的树脂系统。美国每年几乎使用 50 万吨这种材料。不饱和聚酯由不饱和材料组成(例如顺丁烯二酐或富马酸),它溶于活性单体,如苯乙烯。长久以来,一直认为聚酯树脂是对人体毒性最小的热固性树脂,虽然近期对苯乙烯在车间逸散的详尽研究已导致研制了一些替代配方(见第 5 章)。大多数聚酯是空气抑制型的,当暴露在空气中时,不会固化。一般在树脂配方中添加石蜡,它在固化过程中对表面有密封作

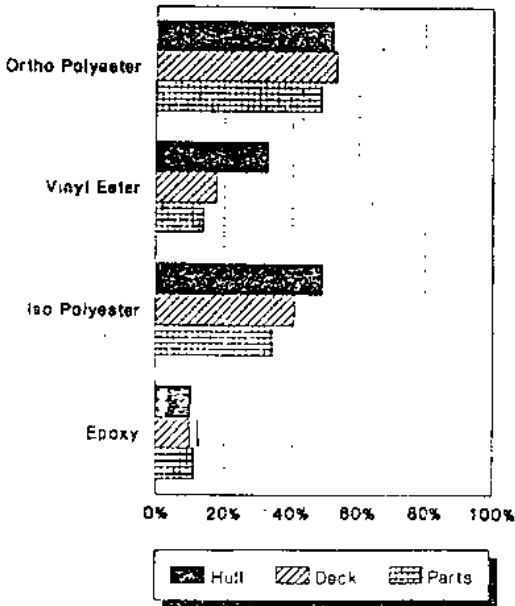


图 5 树脂系统在船舶工业中的用途

用。然而,表面蜡膜会给二次粘接或处理带来麻烦,因而必须用物理方法将其去除。非空气抑制型树脂不存在这一问题,故较广泛地为船舶工业界接受。

船舶工业中使用的两种基本聚酯是邻苯二甲酸树脂和间苯二甲酸树脂。正树脂(ortho resin)是已开发的原始类的聚酯,并仍在广泛使用。其热稳定性、耐化学性及可加工性略受限制。异树脂(iso resin)通常具有较好的机械性能,并显示较好的耐化学性。其耐渗水性的提高便使许多建造者使用这类树脂作为船用层合板中的胶衣或隔离层。

增大饱和酸与不饱和酸之比率可降低聚酯树脂的刚度。柔性树脂的优点是可提高抗冲击性能,然而,这是以牺牲船体桁的总刚度而得来的。非结构性层合板层,诸如胶衣和隔离层,有时用柔性更大的树脂进行配方以抗局部开裂。在该树脂系列的另一端是低标号(low-profile)树脂,设计这种树脂的目的是最大限度地减小增强材料的印透。一般,这几类树脂的极限伸长率值要降低,在表 7 中以 DCPD 表示。

在不加热的情况下,聚酯的固化是靠添加加速剂及催化剂来完成的。胶凝时间可通过改进配方加以仔细控制,以适应环境温度条件及层合板厚度。固化添加剂的下列组合是聚酯最常用的。

表 6 聚酯树脂催化剂和加速剂的几种组配

催 化 剂	加 速 剂
丁酮过氧化物(MEKP)	钴 Napthanate (萘烷酸钴)
Cuemene 过氧化氢物	锰 Napthanate (萘烷酸锰)

如果对垂直表面或过顶表面进行层压作业,则可用其它树脂添加剂来改进树脂粘度。这种效果是通过添加二氧化硅而达到的,在这种情况下,树脂被称为触变型树脂。其它各种填料用来减小树脂在固化时的收缩,这是

胶衣的一种有用特点。

3.2 乙烯基酯树脂

乙烯基酯是由单功效不饱和酸(如异丁烯酸或丙烯酸)和双酚双环氧化合物反应而制成的。得到的聚合物与不饱和单体(如苯乙烯)相混合。乙烯基酯的处理和性能特点与聚酯相似。乙烯基酯的价格较高,但它具有的某些优点可证明这价格是合理的。这些优点包括优异的耐蚀性、水解稳定性及优异的物理性能(如抗冲击性能和耐疲劳性能)。业已表明,采用20~60密耳厚的乙烯基树脂基体的中间层可使层合板具有优异的抗渗水隔离层,从而防止船用层合板中起泡。

3.3 环氧树脂

环氧树脂是一种在分子结构中含有反应功能团的族类广泛的材料。在船舶工业所用的各种树脂中,环氧树脂显示出最佳性能特点。此外,在各种热固性树脂固化时,其收缩最小。各种航天用途,除了当高温性能为关键

性能时以外,几乎都只用环氧树脂。环氧树脂价高而且难以处理,因而限制了它们在大型船舶结构中的应用。表7列出了各种热固性树脂系统的一些对比数据。

3.4 热塑性树脂

与热固性塑料的三维结构不同,热塑性塑料有一维或二维分子结构。热塑性塑料通常以在高温下软化的模型化合物的形式出现。聚乙烯、聚苯乙烯、聚丙烯、聚酰胺和尼龙是热塑性塑料的一些例子。它们在船舶工业中的应用通常限于小船和娱乐游艇。近来已在研究用热塑性增强材料大规模生产结构部件。这种材料的一些有吸引力的特点包括:在固化时没有温升以及扩大了损伤容限。固化时的温升这个问题一直困扰着用热固性树脂时极厚截面的纤维缠绕成型。可加工性以及可与增强材料相匹配的强度是目前正在研究的两个关键领域。

表7 一些热固性树脂系统(浇铸体)的对比数据

树脂类别	Barcol 硬度	抗拉强度 磅/英寸 ² ×10 ³ (kgf/cm ² ×10 ²)	拉伸模量 磅/英寸 ² ×10 ⁶ (kgf/cm ² ×10 ⁵)	极限伸长率 %	价格 美元/磅 (\$/kg)
邻苯二甲酸 Atlas p2020	42	7.0 (4.9)	5.9 (4.1)	.91	.66 (1.45)
双环戊二烯(DCPD) Atlas 80-6044	54	11.2 (7.9)	9.1 (6.4)	.86	.67 (1.48)
间苯二甲酸 CoRezyn 9595	46	10.3 (7.2)	5.65 (4.0)	2.0	.85 (1.87)
乙烯基酯 Derakane 411-45	35	11~12 (7.7~8.4)	4.9 (3.4)	5~6	1.44 (3.17)
环氧 Gouegon GLR 125	84D*	7 (4.9)	4.2 (2.9)	4.0	2.69 (5.93)

* 环氧树脂的硬度值惯常是按“Shore-D”刻度给出

4. 芯材

4.1 轻木

制造厂商使用各种芯材的百分比示于图6。端纹轻木的独立气泡结构由拉长的棱形气

泡组成。其气泡长度(木纹方向)约为直径的16倍(见图7)。密度为6~9磅/英尺³(96.11~144.16 kg/m³)时,材料呈现优异的刚性和胶接强度。在层压过程中,轻木吸收的树脂一般比独立气泡泡沫塑料的多,而且轻木还易

发生水的迁移。但业已表明,这限于平行于木纹的作业。虽然轻木板的静强度一般高于PVC泡沫,但其吸收冲击能的能力较低。端纹轻木可以薄板形式用作平板结构,或以 scrim-backed 方块排列而与复杂曲线相符。关于芯材选择将在第5章中进一步作详细说明。

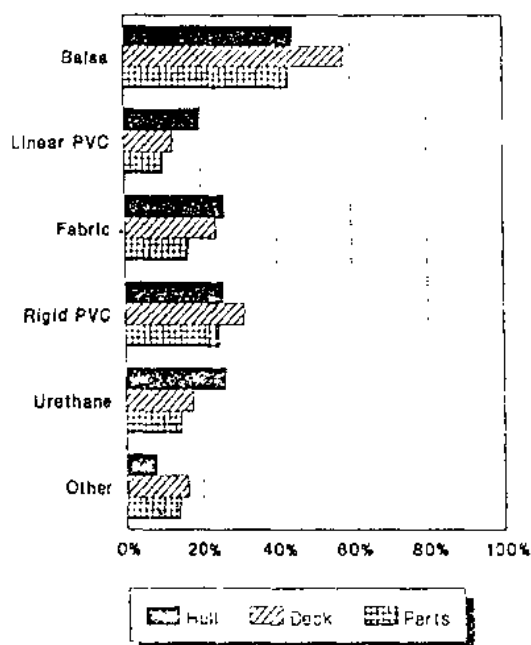


图6 芯材在船舶工业中的用途

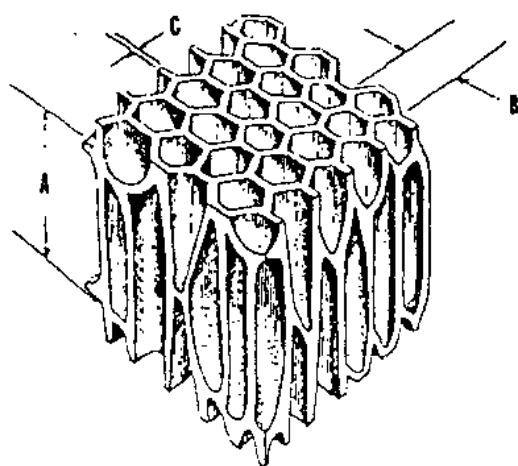


图7 轻木气泡几何形状

A=气泡平均长度=0.025英寸(0.635mm);
 B=气泡平均直径=0.00126英寸(0.032mm);
 C=气泡平均壁厚=0.00066英寸(0.015mm)。

4.2 热固性泡沫塑料

诸如微孔醋酸纤维素(CCA)、聚苯乙烯以及聚氨酯等泡沫塑料很轻(约2磅/英尺³(32.04 kg/m³))而且耐水、耐霉和耐风化。这些材料的机械性能很低,而且聚苯乙烯会受聚酯树脂的侵蚀。这些泡沫不适合复杂曲线。其用途通常限于提供浮力,而不是结构用途。聚氨酯当用作浮力材料时往往现场发泡。

4.3 复合泡沫塑料

复合泡沫的制造方法是将中空的玻璃微粒、环氧和酚醛混成流体树脂,加添加剂和固化剂以形成一种可模塑、可固化的轻质流体物质。Omega 化学公司已推出一种称为 Spray Core™的可喷射的复合芯材。该公司声称,密度为30~43磅/英尺³(480.55~688.79 kg/m³)时,厚度可达3/8英寸(0.9525 cm)。该系统正被作为具有优异物理性能的芯材织物的替代物而加以销售。3/8英寸(0.9525 cm)厚的材料每平方英尺的价格为2.20美元。

4.4 交联PVC泡沫塑料

聚乙烯泡沫芯材是通过将聚乙烯共聚物与稳定剂、增塑剂、交联化合物以及发泡剂相结合而制得的。将该混合物在压力下进行加热以始发交联反应,然后浸在热水槽中以膨胀到所要求的密度。微孔直径为.0100~.100英寸(0.0254~0.254 cm)(与之相比,轻木为0.0013英寸(0.0033 cm))¹²。所得到的材料是热塑性的。这就使该材料可以适用于船体的复杂曲线。PVC泡沫已几乎完全代替聚氨酯泡沫而作为结构芯材,只是在一些现场发泡的结构中除外。一些制造厂商以密度为2~12磅/英尺³(32.04~192.22 kg/m³)的薄板形式向船舶行业销售交联PVC制品。与轻木制品的情况一样,可获得实心薄板结构或 scrim-backed 块结构。

4.5 线型PVC泡沫塑料

Airex 是目前为船舶工业生产的唯一的线型PVC泡沫芯材,由于它具有非连接的分

子结构,故具有独特的机械性能。这种分子结构使其在破坏前有明显的位移。与交联(非线性)PVC相比,Airex的静态性能较差,但有较好的吸收冲击的能力。单个微孔直径范围为.020~.080英寸(0.051~0.203 cm)¹³。在复合材料的力学试验一章中对芯材性能作了详细比较。表8列出了本文介绍的几种芯材的物理性能。

4.6 蜂窝状芯材

制成的各类蜂窝状芯材被广泛用于航天工业。组份材料包括铝、浸渍酚醛树脂的玻璃纤维、聚丙烯和芳纶纤维酚醛处理的纸。密度范围为1~6磅/英尺³(16.02~96.11 kg/m³),微孔尺寸为1/8~3/8英寸(0.3175~0.9525 cm)¹⁴,物理性能随密度按近似线性方式变化,如图9所示。虽然用蜂窝状芯材有可能制成重量极轻的板,但由于它难于与复杂的贴面几何形状相粘接,而且有明显吸水的潜在可能性,故在海洋环境中的用途是很有限的。美国海军曾将铝蜂窝状芯材用作ASROC反潜火箭的壳体而出现一些腐蚀问题。表8列出了Nomex蜂窝状制品的数据。

4.7 PMI 泡沫塑料

Rohm Tech公司销售一种称为Rohacell的复合材料结构用 polymrthacrylimide (PMI)泡沫。这种材料要求最小的层压压力来产生良好的剥离强度。其最有吸引力的特点是它具有经得起超过350°F固化温度的稳定性。表8归纳了普通等级的Rohacell的物理性能。

4.8 FRP 铺板

Seemann玻璃纤维公司于1973年开发了一种称为C-Flex[®]的产品,以有助于不熟练人员建造价格合理的一次完成(one-off)的船体。铺板由与不饱和的连续玻璃纤维无捻粗纱线结合在一起的刚性玻璃纤维棒和轻质玻璃纤维布组成。这种自支撑材料适合于复杂曲线。典型用途包括一组凸形骨架。这种铺板的刚性大于PVC泡沫薄板,这样在阳

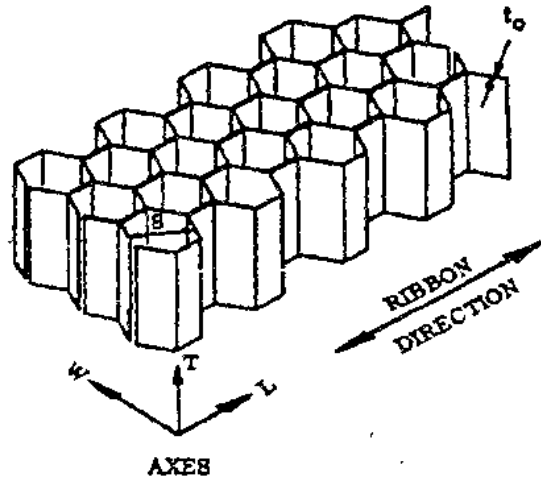


图8 六角形蜂窝状材料的几何形状

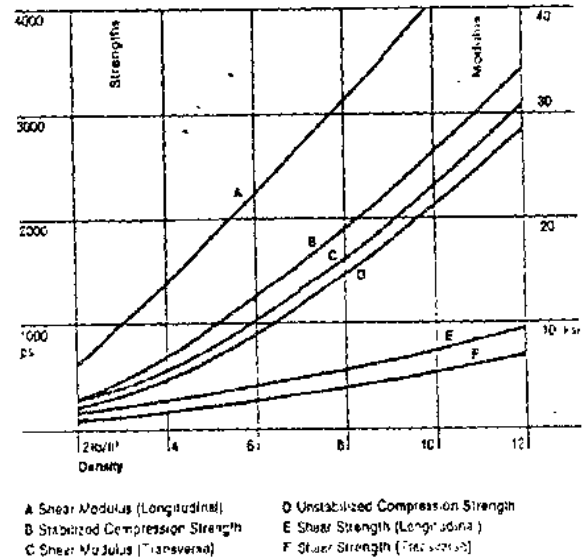


图9 各种密度的芳纶蜂窝状芯材的强度和模量

模上就无需延伸的纵桁。1/8英寸(0.3175 cm)的C-Flex[®]的干重量约为1/2磅(0.227 kg)。其价格约为2美元/英尺²(21.53 \$/m²)。

4.9 芯材织物

各种天然材料和人造材料被用来制造称为“芯材织物”的制品,以此较经济地构成层合板的厚度。一种在船舶工业中普遍使用的这样的制品是由Lantor生产的Firet Core-

mat,即加捻胶粘的聚酯。Hoechst Celanese 近期已推出了一种称为 Trevira[®] 的制品,这是一种连续的长丝聚酯。连续纤维似乎用来生产一种具有优异机械性能的织物。Ozite 用一些无机玻璃质纤维制成一种称为 Compozitex[™] 的芯材织物。该制造厂商声称是用一种独特的制造工艺在织品内产生一种机械

的纤维锁定。虽然许多制造厂商已很成功地在层合板中心使用这种材料,但在层合板近表面处使用非结构厚层来消除印透是危险的做法。这种高模量、低强度层可能产生早期破坏。其它一些制造厂商已开始生产主要用于构成层合板厚度的“增厚”制品。芯材织物材料的一些物理性能列于表 9。

表 8 某些夹层芯材的对比数据

	密度 磅/英尺 ³ (kg/m ³)	抗拉强度 磅/英寸 ² (kgf/cm ²)	压缩强度 磅/英寸 ² (kgf/cm ²)	剪切强度 磅/英寸 ² (kgf/cm ²)	弹性模量 磅/英寸 ² ×10 ³ (kgf/cm ² ×10 ³)	剪切模量 磅/英寸 ² ×10 ³ (kgf/cm ² ×10 ³)	价格 美元/英尺 ² (\$/m ²)
CK 轻木	7 (112.1)	1320 (92.8)	1187 (83.5)	315 (22.1)	370 (26.0)	17.4 (1.22)	2.35 (25.30)
Airex [®] 62.80	5~6 (80.1~96.1)	200 (14.1)	125 (8.8)	170 (12.0)	9.2 (0.65)	2.9 (0.20)	5.37 (57.80)
Divinycell [®] H100	6 (96.1)	450 (31.6)	290 (20.4)	217 (15.3)	17.4 (1.22)	6.5 (0.45)	6.10 (65.66)
Klegecell IIR 100	6.23 (99.8)	479 (33.7)	319 (22.4)	233 (16.4)	11.5 (0.81)	7.0 (0.49)	5.83 (62.75)
Core-Cell [™] C70.75	5 (80.1)	210 (14.8)	184 (12.9)	130 (9.1)	9.6 (0.67)	3.7 (0.26)	3.47 (37.35)
Rohacell [®] 711G	4.7 (75.3)	398 (28.0)	213 (15.0)	185 (13.0)	13.1 (0.92)	4.3 (0.30)	7.54 (81.16)
Nomex [®] HRH-78	6 (96.1)	N/A	1125 (79.1)	200 (14.1)	60.0 (4.22)	6.0 (0.42)	13.53 (145.63)
Nidaplast H8PP	4.8 (76.9)	N/A	218 (15.3)	160 (11.2)	—	—	2.35 (25.30)

表 9 某些“疏松”(“Bulking”)材料的对比数据

材料	型号	干燥厚度 英寸(cm)	固化后密度 磅/英寸 ³ (kg/m ³)	抗拉强度 磅/英寸 ² (kgf/cm ²)	压缩强度 磅/英寸 ² (kgf/cm ²)	剪切强度 磅/英寸 ² (kgf/cm ²)	弯曲模量 磅/英寸 ² ×10 ³ (kgf/cm ² ×10 ³)	价格 美元/英尺 ² (\$/m ²)
Coremat [®]	4mm	.157 (0.399)	37~41 (592.7~656.7)	551 (38.7)	3191 (224.3)	580 (40.8)	130 (9.1)	.44 (4.74)
Trevira [®]	Core100	.100 (0.254)	75 (1201.4)	2700 (189.8)	17700 (1244.4)	1800 (126.5)	443 (31.1)	.28 (3.01)
Baltak [®] Mat	T-2000	0.098 (0.249)	40~50 (640.7~800.9)	1364 (95.9)	—	1364 (95.9)	—	.31 (3.34)
Tigercore	TY-3	.142 (0.361)	35 (560.6)	710 (49.9)	3000 (210.9)	1200 (84.4)	110 (7.7)	.44 (4.74)
Compozitex [™]	3mm	.118 (0.300)	—	—	—	—	—	.35 (3.77)

4.10 胶合板

作为结构芯材还应该提及胶合板,虽然玻璃纤维在与胶合板一起使用时一般被视为只是一种包复层。例外的情况是在硬件设备中的局部增强,在这种情况下,胶合板代替密度较小的芯材以改善层合板的压缩强度。胶合板有时也被作为纵向构件的一种形式,尤其是在发动机基座中。近来由于担心木材在海洋环境中不断吸潮的习性,这会引起膨胀,随后产生分层,使得与FRP一起使用木材的势头有所衰退。胶合板的粗糙表面使它的表面胶粘状况较差。此外,胶合板的低强度和低应变特性可导致早期破坏。

Gougeon Brothers 开发的一种称为木材环氧饱和技术(WEST 系统)将许多层薄木板制成层合板,这就消除了复合结构中使用木材所存在的缺点。

5. 成本方面的考虑

有许多材料可供复合材料船舶结构的船主和设计师选择。迄今,绝大多数的结构都使用玻璃纤维增强材和邻苯聚酯树脂,因为其便于使用,而且价格低廉。当重量、强度、刚度或耐久性等要求非常需要时,使用较高性能的材料被认为是合理的。

在本章最后列有产品说明和试验数据表,以有助于根据 1978 年版 ABS(美国船级社)增强塑料船规范所制定的各种强度标准¹⁵和 1986 年版滨海赛艇指南¹⁶以及 1989

年秋以来的供货厂商报价来评价各种商售增强材料之间在经济方面的差异。为了对来自具体卖主的各种产品加以比较,给出了价格数据。制造厂商应与地区供货厂商接洽,以获得地区性现价信息。

5.1 层合板性能的设定

各数据表包括对表中的各种增强材料保持恒定的一组变量。其关键变量是树脂系统的选择。在给定表格内的所有表列值应有一个用于导出试验数据的共同的树脂系统。通常,在根据价格、制造者的能力、隔离性能、韧性和剪切强度选择增强材料之前,先确定树脂系统。树脂价格是按每磅计而列入数据表的,以便比较需要不同树脂数量的层合板。

在船舶工业中层合板的工艺过程必然由厚度来规定,以符合已确认的造船实践。在层压过程中,干态增强材料经受某种程度的压实。该数值取决于所采用的具体制造工艺,并以百分数形式输入。树脂密度也与发表的固化时的“净”值不同。该现象称之为收缩,也以百分数表示。

劳力变量包括每小时工资率和材料可加以组合的速率。后者以层压一层一平方英尺的层合板所需的小时数表示。0.05 小时/英尺²这一数值约等于 12 磅/小时的基本层合板。这是 Scott 公司对单壳板军用艇所给出的值(见表 10)。对于除标准纤维产品以外的材料规定了难度系统。该系数考虑到处理程序和浸润工艺。

表 10 10 个或 10 个以上同样船体的手糊成型生产率

结构型式	艇的类型	劳力/小时*	英尺 ² /小时**	小时/英尺***
单壳板加筋结构	游览	20	33	.03
	军用	12	20	.05
夹层结构	游览	10	17	.06
	军用	6	10	.10

* 以毡/无捻粗纱布层合板为依据

** 单层毡/无捻粗纱布层合板

*** 层压一层毡/无捻粗纱布的时间

既然计算出的全部数据均依赖于厚度和密度,故包括了对空隙体积的估算。该估算值用以修正估算的层合板总重量,但在任何导出的强度计算中不包括该估算值。

5.2 增强材料说明

本文用制造厂商的牌号来识别所介绍的工业产品。关于这些产品的成分和结构方面的资料请参阅原文 60~67 页(本文略)。基本层合板由一层无捻粗纱布和一层毡组成以形成一个单层。

5.3 试验取向

因为大多数表列材料是各向异性的,故表中包括有关试样取向的数据。在解释这些对比数据(尤其是对于单向增强材料)时,应十分谨慎。大多数材料试验均是沿主要增强材料的轴向进行的。

5.4 纤维重量百分数

在给定的层合板中增强纤维的百分数由烧毁试验确定,并以重量百分数表示。机械性能将随纤维比率的变化而在很宽的范围内变化。强度数据常常以纤维比率的函数给出,这就是在数据表的表列项中必须将该描述符包括进去的原因。

5.5 纤维体积百分数

纤维的体积百分数根据由 Chamis 给出的下列关系式算出^[7]:

$$k_f = \frac{(1 - k_v)}{[1 + (\rho_f / \rho_m)(1 / \lambda_f - 1)]}$$

式中:

k_v = 空隙体积;

ρ_f = 纤维密度;

ρ_m = 树脂密度;

λ_f = 纤维重量百分数。

5.6 干态纤维和未固化树脂的密度

密度是用 1 英寸厚材料的磅/英尺² 为单位来表示的。对于目视观察而言,该基本单位比立方英尺或立方英寸更好。数据由原始材料性能导出。

5.7 固化的层合板密度

固化的层合板密度由以下公式导出:

$$\rho_1 = k_v \times \rho_f \times (1 + \Delta\rho_f) + k_m \times \rho_m \times (1 + \Delta\rho_m)$$

式中:

$\Delta\rho_f$ = 以百分数表示的纤维压紧;

$\Delta\rho_m$ = 以百分数表示的树脂收缩;

k_m = 树脂体积。

5.8 干态纤维厚度

该数值(以密耳为单位)代表在进行真空袋压、辊压、挤压或其它加工之前的机械压紧前,不加树脂的增强材料的厚度。

5.9 纤维重量

该值只是纤维体积和纤维密度之乘积。

5.10 树脂重量

为计算树脂重量,必须求出树脂体积,这就是 $(1-k_t-k_v)$ 。将该值乘以树脂密度便得出树脂重量。

5.11 层合板重量

层合板重量是纤维重量和树脂重量之和。

5.12 增强材料成本数据

增强材料的现价是根据每磅或每码长度的成本列入的,以 50 英寸(127cm)宽辊为依据。增强材料的成本数据是根据到 1989 年 11 月为止的 1000 平方码的数量得出的。

5.13 材料总成本

根据重量来计算每平方英尺增强材料和树脂的材料成本,其总和以每平方英尺单层成本来表示。

5.14 劳动力成本

将输入的劳动率乘以生产率值(英尺²/小时)和指定的材料劳动力系数。

5.15 总的和相对的单层成本

每层的总成本是材料成本和劳动力成本之和。该数值也以达到相等厚度所需成本的形式用相对于基本层合板的百分数来表示。

5.16 强度数据

强度和刚度性能是根据按 ASTM 标准(见第 6 章)进行的试验得出的。至少 1/8 英寸(0.3175cm)的单壳板层合板应采用足够数目的试样进行试验以得出统计上的一致性。应采用按树脂制造厂商推荐的指导原则制作的手糊成型试样。

5.17 单壳板强度判据的厚度比较

用基本层合板的百分数来表示候选材料所要求的厚度。采用的关系式是:

$$\sqrt{\frac{\sigma_{t_{基本}}}{\sigma_t}}$$

式中: $\sigma_{t_{基本}}$ = 基本层合板的挠曲强度;

σ_t = 从属层合板的挠曲强度。

5.18 单壳板刚度判据的厚度比较

当结构的设计受限于挠度判据时,应按材料弯曲模量的立方根对厚度加以比较。因

此,其表达式为:

$$t_1 = \sqrt[3]{\frac{E_{t_{基本}}}{E_t}}$$

式中: $E_{t_{基本}}$ = 基本层合板弯曲模量;

E_t = 从属层合板弯曲模量。

5.19 夹层结构拉伸判据的厚度比较

基本层合板的厚度关系式是根据由 ABS 指南¹⁶ 7.3.2 节给出的对夹层层合板外表层所要求的剖面模数导出的。将该单壳板当量厚度和材料新的挠曲强度和拉伸强度代入剖面模数公式,并与对 1 英寸×1 英寸基本材料壳板推导出的剖面模数作线性比较。如果就剖面模数比较而言,芯材厚度保持恒定不变,则壳板厚度的线性关系式有效。这样,对于某一给定的芯材厚度,替代材料外层板所要求的厚度可用下列公式,以基本壳板厚度的百分数来表示

$$t_1 = \frac{\frac{t_{当量}^2 \times \sigma_t}{6 \times \sigma_t}}{SM_{外层基本}}$$

式中:

$t_{当量}$ = 所要求的单壳板当量厚度,以基本层合板厚度的百分数表示;

σ_t = 从属层合板的抗拉强度;

$SM_{外层基本}$ = 对于与 1 英寸厚单壳板基本层合板的 SM(剖面模数)相匹配的 1 英寸宽夹层板所要求的上层板剖面模数。

以上表达式建立在以下关系式的基础上:

$$SM_{外层} = \frac{(t^2 \times \sigma_t)}{6 \times \sigma_t}$$

式中: t = 单壳板厚度。

5.20 夹层结构压缩判据的厚度比较

压缩判据按上述类似的方式建立在 ABS 内壳板剖面模数公式的基础上。其关系式还原为:

$$t_1 = \frac{\frac{(t_{当量}^2 \times \sigma_c)}{6 \times \sigma_c}}{SM_{内层基本}}$$

式中: σ_c = 从属层合板的压缩强度;