

船用复合材料应用现状及发展

冯利军, 程正冲, 李伏

(西南技术工程研究所, 重庆 400039)

摘要: 对船用复合材料的定义及分类进行了介绍, 并对国内外船用复合材料的应用发展历程及现状进行了阐述。国外船用复合材料应用时间早, 原料制造以及成型工艺发展相对成熟, 目前已成功应用于多种船舶、船体以及上层建筑、桅杆等结构的制造。相比之下, 我国船用复合材料研究起步较晚, 原料生产以及成型工艺较为落后, 在实船应用方面与国外存在较大差距。在此基础上, 分析了我国船用复合材料发展存在的主要问题, 并从设计制造工艺的提升, 以及性能评价技术体系的完善两方面对其未来发展趋势进行了展望。

关键词: 船舶; 复合材料; 应用; 发展

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2017.05.012

中图分类号: TJ04; TJ83 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2017)05-0051-05

Application and Development of Composites for Naval Ships

FENG Li-jun, CHENG Zheng-chong, LI Fu

(Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: In this paper, definition and classification of composites for naval ships were introduced, and the development history and current state of composites application were illustrated. The application of composites in shipbuilding in foreign started earlier, and with the development of material manufacturing and processing improvement, composites had been successfully applied for the construction of different types of naval ships, as well as superstructures, masts and decks, etc. By contrast, the research of composites started much later in our country, and there is a great gap in applications with foreign due to the backward technologies of raw material production and forming process. Based on the utility status and the demand of ship building, the current limitation of the composite applications was analyzed, and the research and development tendency was presented from two aspects of the improvement of design and production technologies, and perfection of the evaluation methods system.

KEY WORDS: ships; composites; application; development

与传统金属结构材料相比, 复合材料具有更高的强度/质量比, 采用复合材料建造船体和结构物, 其质量更轻, 在燃油消耗和提高航速方面具有更佳的性能。同时, 复合材料还具有耐腐蚀、无磁性、可塑性好等优点, 因此, 自复合材料问世以来就一直在造船工业中发挥着重要的作用, 在船舶上的应用研究始终是各主要造船国家的关注焦点。文中对船用复合材料进行了简单介绍, 并对船用复合材料的国内外发展历

程及应用现状进行了阐述, 在此基础上对船用复合材料的发展趋势进行了分析和展望。

1 复合材料的定义

复合材料是由两种或两种以上物理和化学性质不同的物质组合而成的一种多相固体材料^[1]。虽然复合材料各组分材料仍保持其相对独立性, 但复合材料

的性能却并非组分材料性能的简单加和,而是表现出远优于两者的性能。通常在复合材料中有一相为连续相,称为基体,用以粘结、固定、维持增强材料成一定形状;另一相为分散相,称为增强相或增强体,增强材料在复合材料中不构成连续相,它在基体支持下提供强度和刚度。分散相是以独立的形态分布在整个连续相中的,可以是增强纤维,也可以是颗粒状弥散的物料^[2-3]。不同增强材料的形态如图1所示。

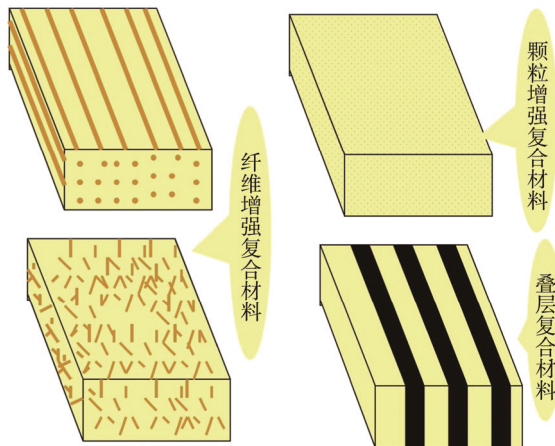


图1 增强材料形式

复合材料的分类方法很多,最基本的按照基体材料类型可以分为^[2]: 聚合物基复合材料,其基体为有机聚合物高分子;金属基复合材料,其基体为金属,如铝基复合材料、铁基复合材料等;无机非金属基复合材料,其基体为陶瓷材料(也包括玻璃和水泥等)。

2 船用复合材料分类

目前,船用复合材料,尤其是应用于船体结构的复合材料,以聚合物基复合材料为主,按结构可分为层合板(纤维增强复合材料)和夹层结构复合材料两大类型,其中包含三个方面的重要复合物:增强材料、树脂(即基体)和芯层材料^[3]。

船用复合材料按照承载部位不同可分为:主承力结构、次承力结构、非承力结构等。按照功能可分为:结构、阻尼、声学(包括吸声、隔声、透声)、隐身(包括吸波、透波、反射、频选)、防护等五大系列材料,船用复合材料的分类及应用部位如图2所示。

船用复合材料性能的优越性主要体现在^[4]:轻质高强,能有效提高船体的储备浮力;结构功能一体化,在满足结构承载的情况下性能可设计,通常具有声学、雷达、减振、防护、低磁等其他性能,一般的材料成型过程同样是结构成型过程;耐腐蚀,可满足高盐、高湿、紫外等苛刻海洋环境要求;耐老化,可满足船舶的长寿命要求。

以上特性有别于其他船舶结构材料,也是其优势

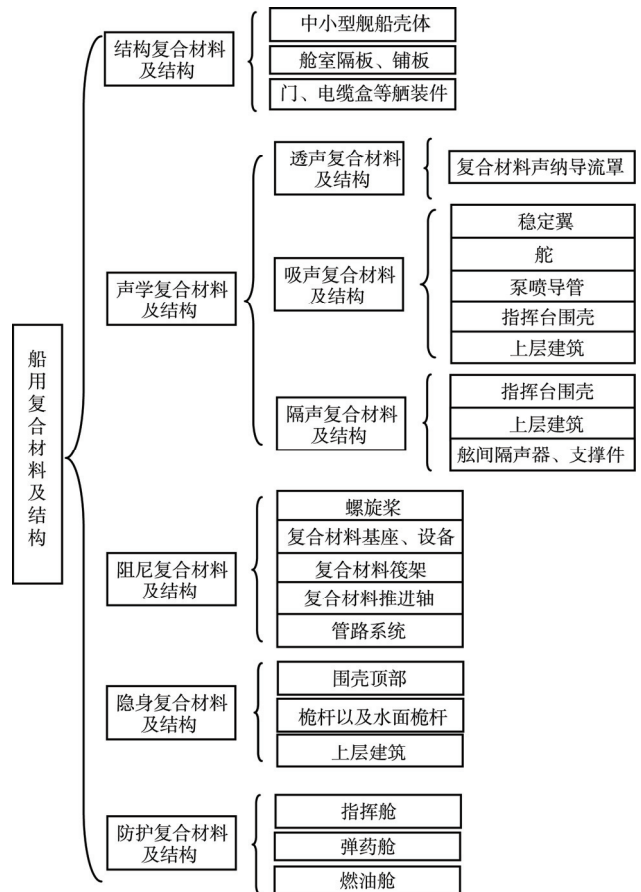


图2 船用复合材料及结构主要类型与典型应用

的体现。从小型快艇开始,复合材料在船舶上的应用大概经历3个阶段^[5]。第一阶段,主要在扫雷艇等小型船舶上使用,性能要求低,可整体成型。第二阶段,在大、中型船舶上得到部分使用,但使用理念仍局限于传统的船体设计,复合材料在船上只是起到减轻质量、提高部件耐腐蚀能力等辅助作用。第三阶段,船舶在设计之初充分考虑使用中所面临的多种复杂情况,使用复合材料作为主船体材料,实现其他材料无法实现或难以实现的功效。目前,船用复合材料已经突破了第二阶段,向第三阶段发展。

3 国内外船用复合材料发展和应用现状

3.1 国外发展和应用现状

早期复合材料都是应用在小型巡逻艇和登陆舰上。相对差的制造质量和船体刚度限制了船舶的长度不能超过15m,排水量不超过20t。近年来,随着复合材料设计、制备成本的降低,以及力学性能提高,复合材料开始在大中型舰船,如猎雷艇和轻型护卫舰上得到应用。随着技术的发展,船舶的长度呈稳定的增加趋势,现在已有80~90m长的全复合材料海军舰船。

美国是复合材料科学技术发展最先进,复合材料应用最广、用量最大的国家,在船舶复合材料的应用方面,其规模和技术都走在世界前列^[6-10]。美国海军于 1946 年采用聚酯玻璃钢建成了交通艇,是世界上第一艘复合材料舰船,随后又制造了玻璃钢登陆艇、工作船等。为加快玻璃钢船舶的发展,美国海军在 20 世纪 50 年代中期规定 16 m 以下船舶必须用复合材料制造。1954 年前后,美国的手糊成型工艺日趋成熟,1956 年建造了 2 艘不同结构形式的小型扫雷艇,开始了玻璃钢在扫雷艇中的应用研究。20 世纪 60 年代早期,美国海军制造了第一艘全玻璃钢巡逻艇,20 世纪 80 年代末 90 年代初建造了复合材料猎/扫雷艇,艇体均采用高级间苯聚酯树脂,并以半自动浸胶作业制造,同期制造了采用凯夫拉增强的聚酯树脂单壳结构的巡逻艇^[10]。随后,美国海军又将复合材料引入了深潜器的制造^[11-12]。1966 年采用石墨纤维增强环氧树脂建造的深潜器,其下潜深度可达 6096 m。进入 21 世纪后,美国进一步加强了复合材料在船舶建造的应用,采用新型高强碳纤维/乙烯基树脂的夹心层结构,取代传统玻璃纤维等低强度纤维,建成的新型船舶稳定性高、航速快,并具有隐身、反潜、反水雷能力^[13]。

欧洲复合材料船舶工业也十分发达。20 世纪 60 年代中期,英国采用玻璃钢先后制造了 450 t 的大型扫雷艇和 625 t 的猎雷艇,1973 年采用复合材料建造了全玻璃钢反水雷艇,其成功应用推动了复合材料的迅速发展,20 世纪 80 年代早期就制造了 200 多艘全复合材料反水雷船舶。20 世纪 90 年代,英国成功应用碳-玻混杂纤维建造了摩托艇、巡逻艇等^[14],随着技术的发展,近年来还成功应用回收塑料瓶再加工材料建造舰船,不仅降低了成本,还符合材料生物降解以及循环利用的发展方向。瑞典于 1974 年建成了第一艘夹层结构的玻璃钢扫雷艇,20 世纪 90 年代成功研制了世界上第一艘复合材料隐形试验艇,并逐步发展形成了以高性能碳纤维和夹芯结构为特点的建造方式,开发建造了集先进复合材料技术和隐身技术于一体的系列轻型驱逐舰,已成功下水服役。意大利于 20 世纪 80 年代中期开始相继建成多艘玻璃钢扫雷艇^[15]。

日本自 20 世纪 50 年代起就开始建造玻璃钢船,在高性能船、赛艇和豪华游艇建造方面取得了不俗的成绩。进入 21 世纪,日本开始研究制造高性能复合材料军用船舶,目前已成功建成第一艘玻璃钢复合材料扫雷艇并投入使用^[16]。

各国海军应用的复合材料制品还包括船舶上层建筑、推进器、桅杆等。法国海军于 1992 年开始在船舶上层建筑采用复合材料,可以有效降低船舶质量^[17]。前苏联最早将复合材料螺旋桨用于实船^[18-19]。瑞典于 1989 年开始研制复合材料推进轴,对几千种不同

材料及表面处理方法进行了试验和评估以获得轴的最佳性能,制得的推进轴质量轻、弹性好、适应性强、不导电、耐腐蚀^[20]。美国从 1995 年开始采用复合材料研究先进的全封闭桅杆,并成功装备于驱逐舰、航空母舰等^[20]。此外由于复合材料可降低船舶的雷达信号特征以及红外(热)信号特征,因此复合材料还广泛应用于烟囱、舱壁、甲板、舵等次承载结构,在隐身及结构减重方面所做的贡献非常显著^[10]。

3.2 国内发展和应用现状

我国复合材料在船舶方面的研发应用起始于 1958 年,第一艘玻璃钢工作艇诞生于上海。在 20 世纪 70 年代中期曾研制过一艘总长近 39 m 的扫雷试验艇,此后对 GRP/CM 反水雷舰艇的研发工作就中断了十多年。20 世纪 90 年代以来,随着技术与工艺引进,我国采用复合材料生产了大量游艇、帆船、救助艇,以及公安、武警、海监、海关等航速较高的巡逻艇、执法艇、缉私艇等准军事艇,但迄今为止还未设计建造一艘高科技含量的海军反水雷舰艇^[21]。在复合材料船舶构件方面,我国在 20 世纪 60 年代末成功研制了复合材料声纳导流罩,并应用于潜艇,发展至今已形成较为成熟的应用^[22]。20 世纪 80 年代后期研制开发了复合材料雷达天线罩、水雷壳体并投入使用^[23],20 世纪 90 年代成功研制了应用于大型水面船舶的复合材料桅杆以及上层建筑等^[24-25]。与国外相比,目前我国船用复合材料应用范围和规模仍然较小。

在原材料方面,目前我国已能生产国际市场上大多数品种的玻璃钢用增强材料,但与世界工业发达国家相比,在产品技术水平、品种、规格、质量等方面仍有较大差距,碳纤维、芳纶纤维等高性能纤维仍依赖于进口,树脂产能也严重落后。在成型加工方面,RTM 工艺以其产品质量好、生产效率高优点得到了广泛关注与快速发展,在工业发达国家已发展相当成熟,并且不断趋于完善,而我国则从 20 世纪 80 年代才开始引进 RTM 工艺和设备,投入生产少,设备利用率低,目前 RTM 工艺仍处于发展阶段^[26]。与国外相比,现阶段我国在船舶复合材料领域的应用技术和研发方面仍较为落后,仍有很大的发展空间。

4 存在的问题

尽管复合材料在国外海军强国已具有较长的应用历史,而我国的快艇、导流罩等方面虽也有所应用,但进展缓慢,其原因在于复合材料自身的特点与传统金属材料不同,复合材料具有极强的可设计性,其材料性能与制造工艺密切相关,而目前缺乏相关设计规范、经验数据以及可靠性评价技术和指标体系。目前,复合材料在船舶应用方面存在的问题主要有以下几

个方面。

1) 高性能、低成本的船舶用复合材料设计与制造。多年以来,在大部分造船应用中,复合材料与传统材料(除了木材外)相比,在成本上都不具备竞争力。迄今为止,大部分复合材料结构都采用树脂浸渍增强材料制造而成,此工艺周期长、劳动密集、费用昂贵,且难以控制产品质量。生产高质量的复合材料需要船舶制造商引进新的制造方法,而船舶制造商正缺乏模型和大型稳定的数据库信息来预测复合材料结构的制造成本^[27]。

2) 船用复合材料可靠性评价技术和指标体系。当船舶结构在受到冲击、震动、碰撞和火灾时,极易发生失效,然而目前还没有能够确定其是否失效的分析工具。此外,由于复合材料的各向异性,其缩放规则特别复杂,因此,在开展结构设计时相比金属要复杂得多^[28]。

3) 船用复合材料性能基础数据积累。有限的数据库阻碍了复合材料在船舶上的应用。复合材料结构需要通过一系列严格的规定,内容涉及物理力学性能、环境老化性能、抗气流冲击、抗水下振动损坏、防火性能(可燃性、明火、烟尘、毒性、结构整体性)、碎片/弹道保护以及雷达/声纳性能。评价复合材料结构和功能是否可靠所需要的数据极其有限,而测试确定复合材料在冲击、振动、弹道和明火条件下的性能,是一项时间长而且费用昂贵的工作。评估复合材料的安全性和可靠性,满足设计要求的复合材料上船舶应用面临的一个主要问题^[28—29]。

5 船用复合材料发展趋势

复合材料在船舶应用方面具有极大的优势,加快复合材料的设计和研发是解决阻碍其在船舶方面应用的主要问题。未来船用复合材料发展方向首先是设计工艺的改进^[27]。复合材料发展趋势在于设计制造高性能、低成本复合材料,推动复合材料由非承力结构向主/次承力结构发展,从局部使用向大规模应用拓展,加大复合材料的研发和应用力度,使其具有低成本、高性能、多功能、优化连接、长寿命、安全可靠等特点。由单一承载功能的结构型复合材料向兼具防弹、隔声、吸声、阻尼、雷达隐身等特性的多功能型复合材料发展,同时配套研发复合材料结构之间及其与钢结构之间方便、可靠的连接技术等^[29]。

船用复合材料的另一个发展方向是对复合材料的设计、工艺和制造进行全面的研发,制定统一规范的设计标准,同时开展复合材料性能评价技术研究^[28]。在目前复合材料小样性能研究的基础上,重点以复合材料典型结构单元、局部模型为对象,开展老化性能、疲劳性能、阻燃性能、抗爆性能、耐冲击性能等性能参数的

测试,形成覆盖复合材料小样、典型结构单元、局部模型的性能试验方法,推动复合材料在船舶上的规模化应用。同时,发展船用复合材料工艺评定技术,以船用复合材料结构的典型部位为对象,研究工艺样件的质量一致性,形成船用复合材料工艺评定的方法^[30]。针对船用复合材料不同的应用环境进行分析、归纳,以几种典型的复合材料为研究对象,依托环境试验平台,通过复合材料大量长期海洋环境性能试验(如:海水全浸、潮差、大气暴晒等)和实验室模拟加速性能试验,获取海洋环境下复合材料的性能演化规律,并建立寿命预测模型,形成船用复合材料耐海洋性能的评价程序、流程和方法,为复合材料的结构设计、长期可靠应用、维护、换装提供技术支撑^[31]。

参考文献:

- [1] 益小苏,杜善义,张立同. 复合材料手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [2] 沃丁柱. 复合材料大全[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.
- [3] ASSOCIATES E G. 舰船复合材料[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2013.
- [4] DAVIES P, RAJAPAKSE Y. 船舶与海洋工程复合材料耐久性[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015.
- [5] 黄晓艳, 刘源, 刘波. 复合材料在舰船上的应用[J]. 江苏船舶, 2008, 25(2): 13—17.
- [6] 王晓强, 魏忠仁, 宫平, 等. 抗弹复合材料在舰船防护上的应用研究[J]. 工程塑料应用, 2014, (11): 143—146.
- [7] MARSH G, JACOB A. Trends in Marine Composites[J]. Reinforced Plastics, 2007, 51(2): 22—23.
- [8] FIORE V, BELLA G D, VALENZA A. Glass-basalt/epoxy Hybrid Composites for Marine Applications[J]. Materials & Design, 2010, 32(4): 2091—2099.
- [9] SHIVAKUMAR K N. Carbon/Vinyl Ester Composites for Enhanced Performance in Marine Applications[J]. Journal of Reinforced Plastics & Composites, 2006, 25(25): 1101—1116.
- [10] 唐红艳, 王继辉, 徐鹏遥. 复合材料在海军舰艇上的国内外应用现状及进展[J]. 船舶, 2006(2): 6—11.
- [11] 朱锡, 石勇, 梅志远. 夹芯复合材料在潜艇声隐身结构中的应用及其相关技术研究[J]. 中国舰船研究, 2007, 2(3): 34—39.
- [12] 赵俊海, 侯德永, 马利斌, 等. 新型复合材料在深海载人潜水器上的应用[J]. 中国造船, 2008, 49(3): 87—97.
- [13] LUNDQUIST E H. Composites, Aluminum and Titanium for Ship Construction[J]. Naval Forces, 2014(4): 44—49.
- [14] 李江涛, 罗凯, 曹明法. 复合材料及其在舰船中应用的最新进展[J]. 船舶, 2013, 24(1): 10—16.
- [15] 张国腾, 陈蔚岗, 唐桂云. 复合材料轻量化技术在舰船制造领域的应用[J]. 纤维复合材料, 2010, 27(1): 31—35.
- [16] 祁斌. 关注非钢材料在军船建造中的应用[J]. 船舶物资与市场, 2015(2): 42—47.

- [17] 钱江, 李楠, 史文强. 复合材料在国外海军舰船上层建筑上的应用与发展[J]. 舰船科学技术, 2015(1): 233—237.
- [18] 张帅, 朱锡, 孙海涛, 等. 船用复合材料螺旋桨研究进展[J]. 力学进展, 2012, 42(5): 620—633.
- [19] 陈晴. 船用复合材料螺旋桨性能预报及优化设计[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [20] 高靖. 封闭式树脂基复合材料的桅杆设计[D]. 南昌: 南昌大学, 2011.
- [21] 蔡斌. 复合材料在船艇工业中的应用[J]. 功能高分子学报, 2003, 16(1): 113—119.
- [22] 丁新静, 于柏峰, 迟波. 新型高性能复合材料声呐罩的制造[J]. 玻璃钢/复合材料, 2011, (3): 52—54.
- [23] 李刚. 舰用桅杆复合材料天线罩结构设计研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
- [24] 郭琼, 杨帆, 王荣国, 等. 轻质碳纤维复合材料帆船桅杆的设计与制备[J]. 玻璃钢/复合材料, 2010, (3): 72—75.
- [25] 施军, 黄卓. 复合材料在海洋船舶中的应用[J]. 玻璃钢/复合材料, 2012(s1): 269—273.
- [26] 李涛, 高兴, 高伟辉, 等. 船舶用复合材料的性能研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2011, 217(2): 32—35.
- [27] 刘土光. 复合材料在舰船上的应用展望[J]. 舰船科学技术, 2005, 27(3): 9—11.
- [28] 李涛, 曲艳双, 周秀燕, 等. 复合材料老化性能影响因素的研究[J]. 纤维复合材料, 2015, 32(2): 22—25.
- [29] 李振华, 范细秋, 张玉莲. 海洋环境下玻璃钢复合材料耐腐蚀性能研究[J]. 船海工程, 2008, 37(s1): 24—26.
- [30] 陈念众, 张圣坤, 孙海虹. 复合材料船体纵向极限强度可靠性分析[J]. 中国造船, 2002, 43(2): 29—35.
- [31] 罗益锋, 罗晰旻. 高性能和多功能轻质材料在国防装备的应用进展[J]. 高科技纤维与应用, 2015, 40(6): 1—11.