



高性能复合材料研究进展及 在船艇工业中的应用

1010101010101010101010101010101

上海船舶工艺研究所
上海中船材料工程有限公司

二〇一二年四月

Contents 目录

1



高性能复合材料研究进展

2



船艇工业中的应用

复合材料的特性

1 优良的力学性能

1



高性能复合材料研究进展

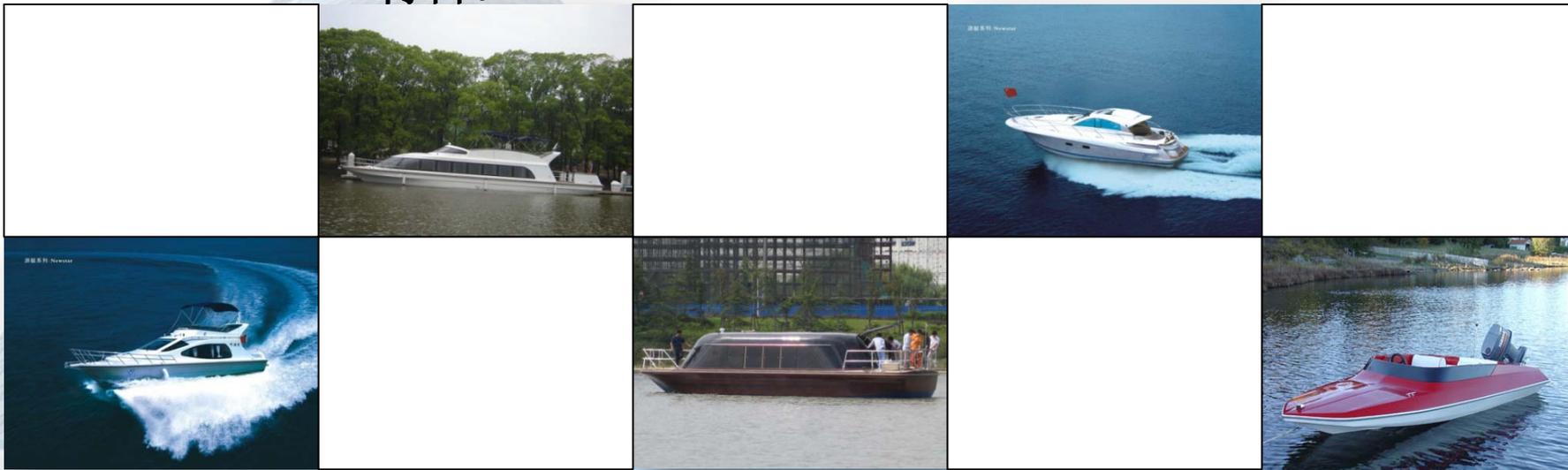
材料	密度 (g/m ³)	拉伸强度 (GPa)	杨氏模量 (GPa)	比强度	比模量
Al-Zn-Mg合金	2.8	0.5	72	0.18	25.7
钢	7.85	0.6-2.05	207	0.08-0.26	26.7
尼龙66	1.14	0.07	2	0.061	1.75
玻纤增强尼龙66	1.47	0.21	14	0.14	9.52
碳纤维增强环氧树脂基复合材料	1.62	1.40	220	0.86	135.0
玻纤增强环氧树脂基复合材料	1.93	0.75	38	0.39	19.7

复合材料的特性

2 优异的耐腐蚀性能



复合材料具有优异的耐腐蚀性能,可耐酸、耐碱、耐海水浸蚀,抗水生物附生,是船艇建造的理想材料。



复合材料的特性

3 优良的声、磁、电性能

- ▶ 复合材料透波、透声性好,无磁性,介电性能优良,适宜作舰艇的功能结构材料。如声纳导流罩
- ▶ 复合材料无磁性,是猎扫雷艇的上佳结构材料。
- ▶ 复合材料的透波性好,可作为船艇的雷达罩材料。
- ▶ 复合材料的导热系数低,隔热性好,适合制造救生艇、冷藏船和潜艇液氧罐的支承结构材料。

复合材料的特性

4 优良的设计、施工性能

- ▶ 具有可设计性，可根据船艇不同部位的结构要求,进行材料、铺层和结构的优化设计。
- ▶ 材料和结构的一体性，用于制造船艇,可大大减少车、钳、刨等机械加工过程和装配过程,使船壳和构件的整体性好,无接缝或少接缝,无渗漏,提高了船艇的性能。
- ▶ 复合材料还具有易成型、易修补的特点,适宜制造结构复杂的船型,可缩短建造周期,复合材料船艇的维护费用也低于钢船和木船。

复合材料的研究进展

船舶轻量化化发展需求

- ▶ 美国已经开发并在主要和辅助的结构材料中使用复合材料，轻质底座、甲板舱室和桅杆；
- ▶ 机械部件如复合管道、阀门、离心泵和热交换器；辅助或支撑设备如格栅、支柱、通风屏、通风管和天窗等均已使用复合材料。
- ▶ 结构复合材料是典型的溴化乙烯酯类树脂基玻璃增强纤维复合材料包覆轻质软木芯。一些最新的大型复合材料的应用包括高级封闭式桅杆/传感系统
- ▶ （AEM/S，已在USS Radford DD 968水面舰船上安装），LPD17 AEM/S，DDG51 正向导航仪和复合材料直升机库计划。

复合材料的优势：减少维修，节省重量和增加隐蔽性和提供与金属组件相比而具有更多的选择性以降低使用周期成本。

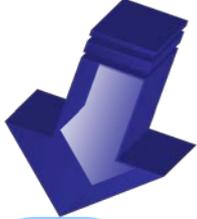
复合材料的研究进展

聚合物基复合材料在船上应用的重要问题

失火或故意纵火时可能会点燃复合材料，在舰船封闭和密封的空间里，大火能点燃周围所有易燃物质，并释放出大量的有毒有害烟雾。如果复合材料构件是其关键结构，这将可能引起结构坍塌。

目前所使用的表面无保护的标准夹心复合材料，无法达到所有舰船内部人工操纵部位的耐燃性能要求。在实际尺寸的模型室墙角实验中，未保护的夹心复合材料（临界点燃热流约为**15kw/m²**，点燃温度约**384℃**）在**2分钟**之内就被点燃。从复合材料的面层烧至软木芯层将近**11分钟**，此时系统总热释率接近**1.0MW**，燃烧物热释率迅速增至**300kW**。

复合材料高性能基体树脂的需求



性能需求

- ▶ 新型树脂和芯材并且其力学性能与乙烯酯树脂和软木相当，与酚醛树脂一样，具有优良阻燃性能。



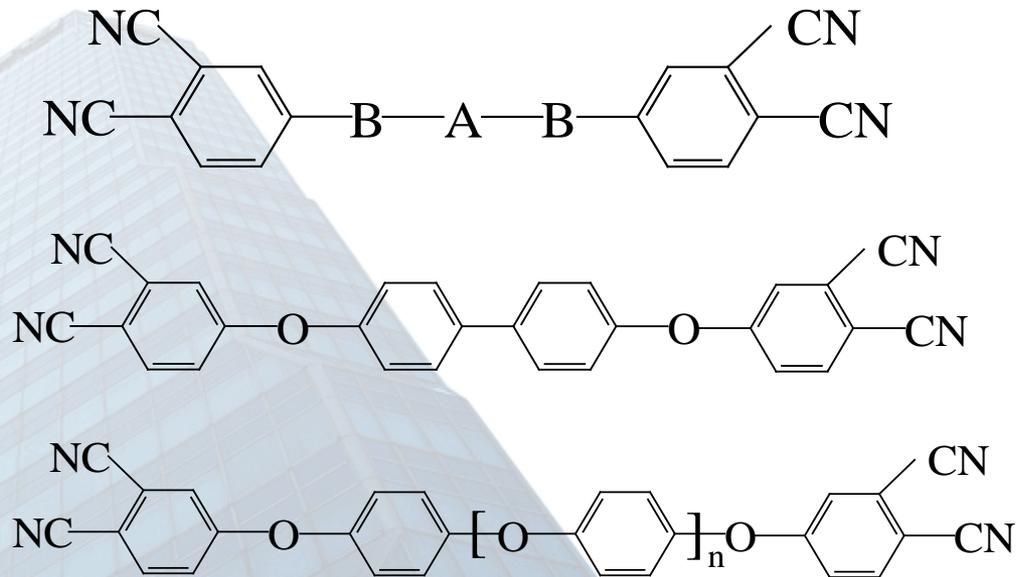
工艺需求

- ▶ 复合材料成型工艺简单，可通过真空辅助树脂传递模塑成型。



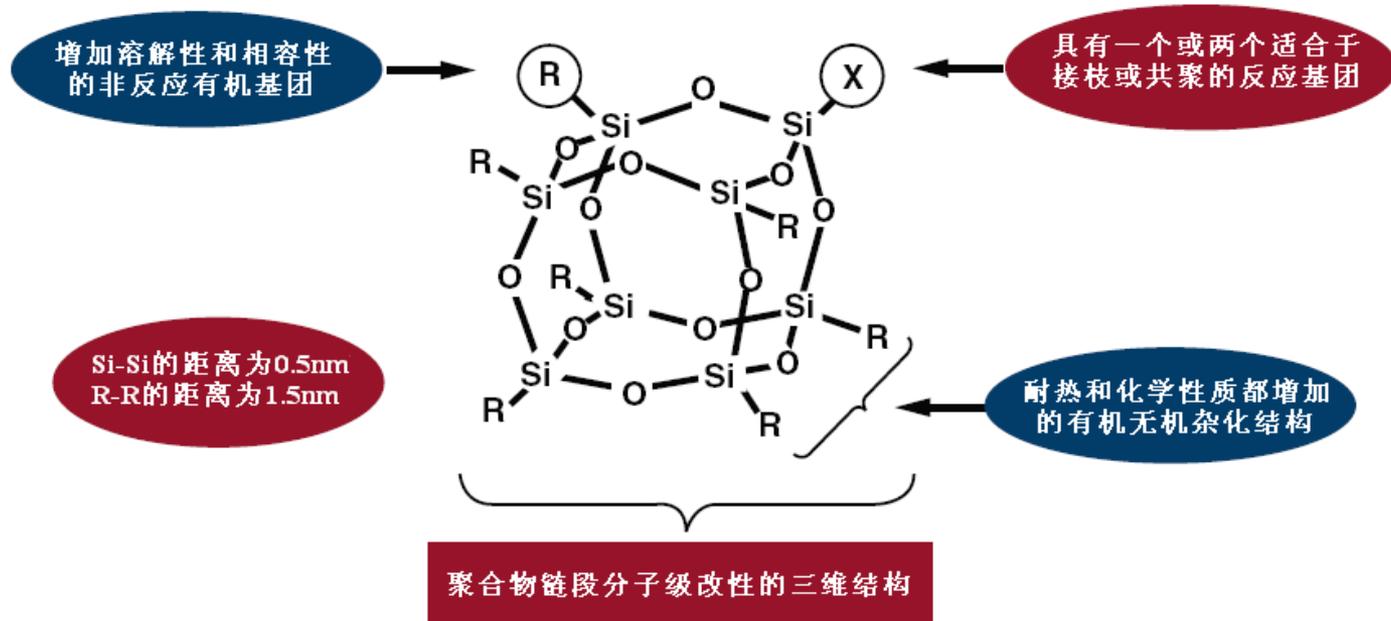
聚邻苯二甲腈树脂

聚邻苯二甲腈是满足**MIL-STD-2031**标准要求的耐燃、低烟和低毒性的少数几种材料之一。



POSS材料体系

POSS材料：多面体低聚倍半硅氧烷齐聚物（Polyhedral Oligomer Silsesquioxane）的简称。



碳泡沫材料 (CFOAM)

1998年，美国防部下属的**Touchstone** 研究实验室 (TRL) 为美国海军研究开发了新一代高性能舰船用结构材料—具有绝热保温、降噪阻燃、耐**1000℃**以上高温的多功能碳泡沫材料。

- ▶ 通过一种可控炼焦工艺，利用价格低廉、低挥发物的烟煤提纯物来制备的。
- ▶ 先将烟煤进行焦化、提纯，在高压釜中发泡成型，进行热处理至力学性能、耐热性能和物理性能符合规定的要求，
- ▶ 在高温锻烧中去除泡沫中的水分，形成阻燃、抗压、抗冲击、低导热系数的碳泡沫材料。



美国已经将碳泡沫材料应用于舰船的舱壁、甲板、通风管道、壳体等部位的防火隔热和吸声降噪。

碳泡沫材料主要物理机械性能

主要物理机械性能	性能数据
密度 (g/cm ³)	0.4 — 0.6
压缩强度 (MPa)	13.8 — 20.7
拉伸强度 (MPa)	2.76 — 6.9
剪切强度 (MPa)	2.07 — 2.76
冲击强度 (KJ/m ²)	0.34 — 0.46
热膨胀系数 (10 ⁻⁷ /°C)	5.5 — 6.3
导热系数 (W/m.k)	25°C 100°C 300°C
	0.3 0.35 0.53
电阻率 (ohm-cm)	0.01 — 10,000,000
降噪, 吸声系数	>100
阻燃 (Kw/m ² , 临界热流)	0.1 — 0.4

IPN改性酚醛树脂

酚醛树脂结构

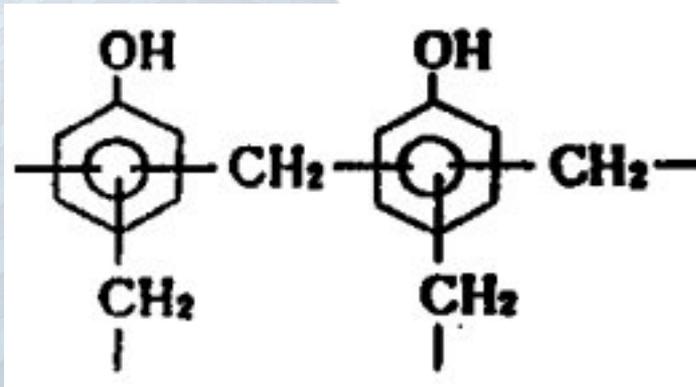
酚醛树脂具有国际公认的低**FST**特征和脆性：

阻燃性 **Low Flammability**

低烟密度 **Low Smoke Density**

低毒性 **Low Toxicity**

脆性，不耐冲击

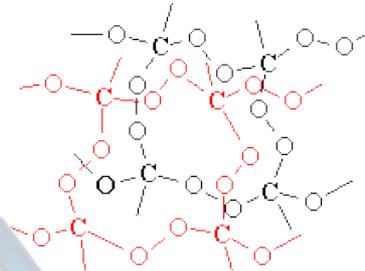


酚醛树脂改性常用方法

- ▶ 内增韧化学结构改性— 通过酚羟基醚化、酚核间引入长亚甲基链等柔性基团，增加交联网的弹性。
- ▶ 添加韧性高分子材料的外增韧物理改性— 与橡胶弹性体、热塑性树脂等韧性高聚物机械共混。
- ▶ 掺入惰性填料改性— 加入木屑、石棉、短切玻璃纤维等非活性填料。

酚醛树脂改性新方法

IPN



IPN的化学物理过程

超分子级混合的超级聚合物合金

在50kW/m²下各种材料的耐燃性能

复合材料体系	点燃时间 (s)	最大热释率 (kW/m ²)	平均热释率300s (kW/m ²)
MIL-STD-2031	>150	<65	<50
Glass/VE (brominated bisphenol A epoxy vinyl-ester)	22	314	98
Glass/epoxy	105	178	98
Glass/Cyanate ester	58	130	71
Graphite/BMI	110	74	51
Glass/phenolic	210	47	38
Glass/polyimide	175	40	27
Glass/Phthalonitrile	437	35	24

成型工艺研究进展

成型工艺发展

树脂传递模塑成型
(RTM)

热压罐成型

真空导入树脂成型

低成本制造、高性能

高成本成型工艺、高性能

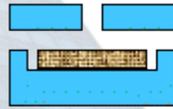
低成本制造，性能一般

1

RTM成型

树脂转注成型**RTM**，是一种以低压、密闭容器制造的复合材料制成方法，先把纤维、基材放入于模具中，密闭之后以低压灌入树脂，等到树脂反应硬化之后，打开模具将成品拿出。而成品的形状可大可小较不受限制。

Center gate



關模



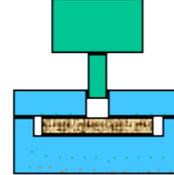
纖維+樹脂



開模



resin



灌注

VARTM成型

在模具型面上先铺放纤维增强材料，然后在其上铺设真空薄膜，并在型腔边缘严密密封后，再将型腔内抽真空，然后让树脂通过精心设计的树脂分配系统在真空作用下注入模腔内。真空辅助成型是在真空状态下排除纤维增强材料中的气体，利用树脂的流动和渗透，来实现对纤维及其织物的浸渍，并在室温下进行固化，最后形成具有一定树脂/纤维比例的FRP/CM结构。

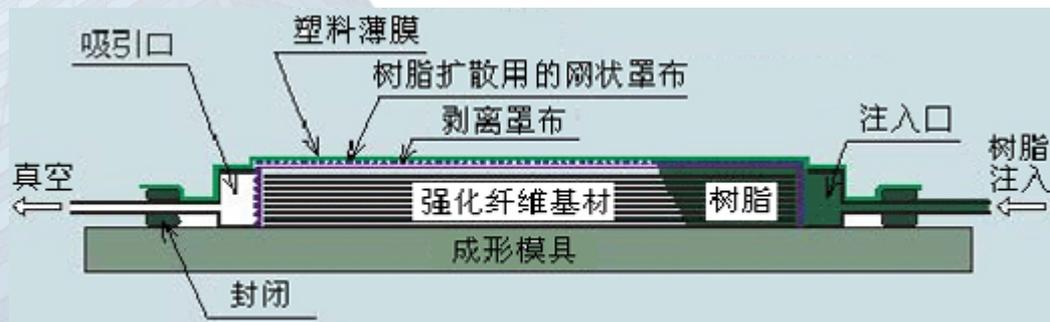
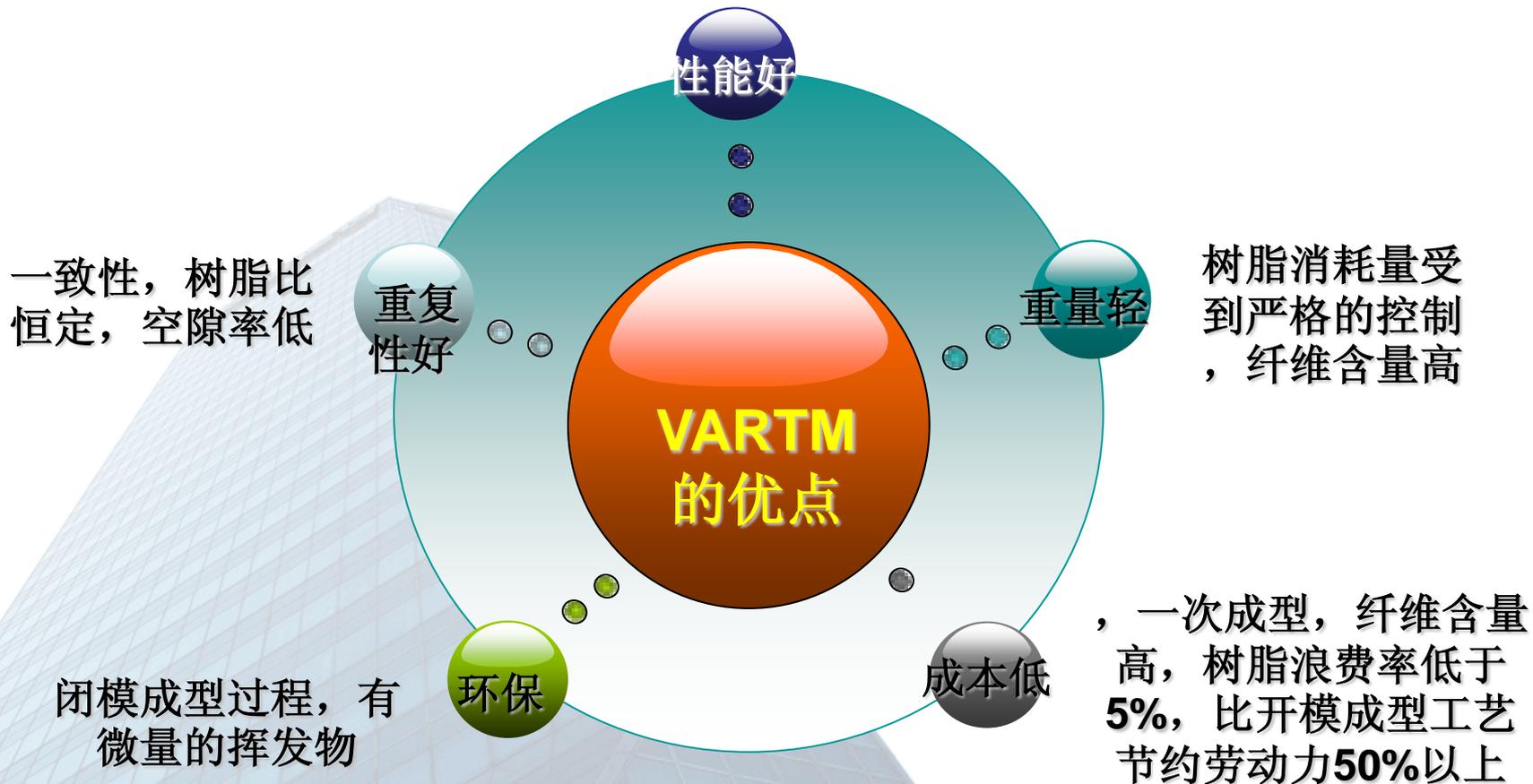


图 1 VaRTM 成型法的原理图

结构件的强度和刚度等至少可
提高**25%**以上，且性能均匀



真空辅助成型工 艺的应用实例

- ▶ 英国Vosper Thornycroft公司的“Sandown”级猎扫雷舰的所有上层建筑和主船体中的部分内部结构；
- ▶ VT公司替代原来传统的开模成型工艺，制造了长14m的游艇，并开发了新一代游艇系列；
- ▶ 瑞典海军的“Visby”级全隐身轻型护卫舰长72m、宽10.4 m、满载排水量620 t，是目前世界上最长的主要由碳纤维复合材料制成的海军舰艇，见图22.3-17其船体、甲板和上层建筑等都是采用真空辅助成型工艺制造的；
- ▶ 挪威的“Skjold”级隐身巡逻艇和美国海军最新研发的M船型“短剑”号超高速隐身艇。



瑞典海军的“Visby”级全隐身轻型护卫舰

1

热压罐成型工艺

热压罐成型工艺是 生产高质量先进树脂基复合材料制件的主要方法。

主要特点

压力
均匀

惰性气体或空气向罐内充气加压，作用在真空带表面各点的法线上的压力相同，使真空带内的构件在均匀压力下成型、固化。

温度
均匀

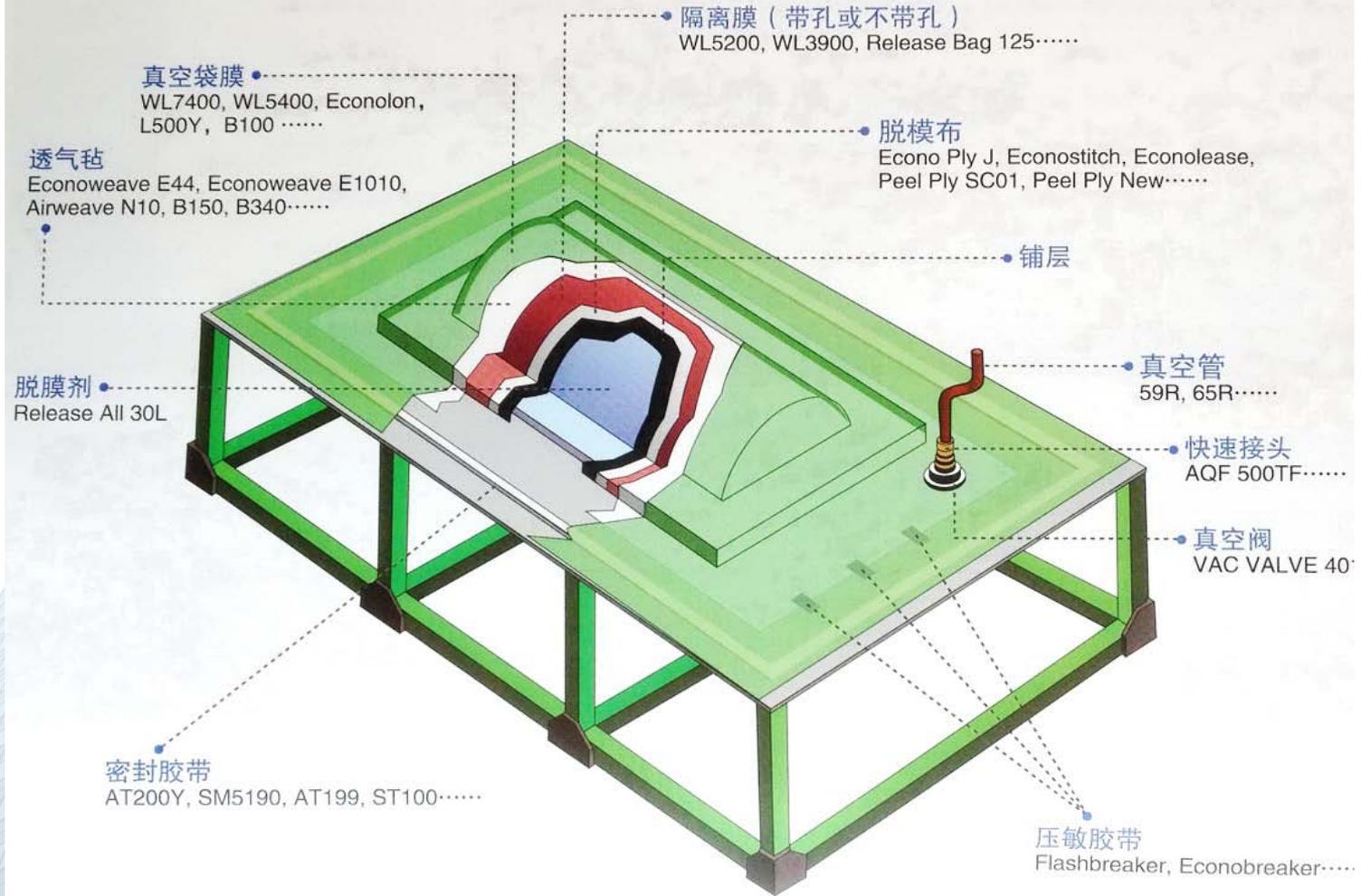
罐内装有大功率风扇和导风套，气体在罐内高速循环，各点气体温度基本一致，保证模具上的构件在升温过程中温度基本保持一致。

适用
范围广

模具相对比较简单，适合大面积的蒙皮、壁板和壳体的成型，热压罐的温度和压力条件几乎可满足所有的聚合物基复合材料的成型。

稳定
可靠

由于罐内压力和温度均匀，保证成型或胶接构件的质量稳定。该工艺制造的构件孔隙率较低，树脂含量均匀，与其他工艺相比，构件力学性能稳定，可靠。

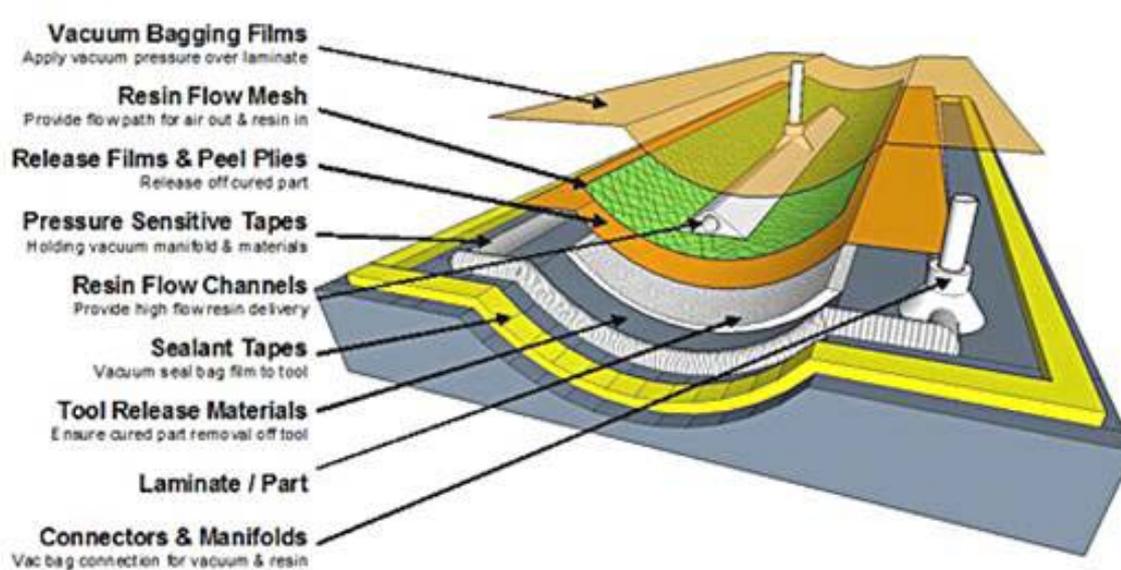


典型的真空袋工艺封装结构示意图

3

真空导入工艺

真空导入工艺（**Vacuum infusion process**），简称**VIP**，在模具上铺“干”增强材料（玻璃纤维，碳纤维，夹心材料等，有别于真空袋工艺），然后铺真空袋，并抽出体系中的真空，在模具型腔中形成一个负压，利用真空产生的压力把不饱和树脂通过预铺的管路压入纤维层中，让树脂浸润增强材料最后充满整个模具，制品固化后，揭去真空袋材料，从模具上得到所需的制品。



主要特点

质量高

在真空环境下树脂浸润玻纤，与传统制造工艺相比，制品中的气泡极少。玻纤含量很高，可达到时70%，甚至更低。所得制品重量更轻，强度更高。

损耗少

用VIP工艺，树脂的用量可以精确预算，对于手糊或喷射工艺来说，会因操作人员的多变性而难于控制。

分布均匀

不同部分的真空产生的压力是一致的，因此树脂对玻纤的浸润速度和含量趋于一致。

挥发少

生产过程中不会造成树脂的泼洒或滴落现象发现，更不会有大量的气味出现。所以它能提供一个干净、安全和友好的工作环境，保护操作者的身心健康。

单面模具

仅用一面模具就可以得到两面光滑平整的制品，可以较好的控制产品的厚度。节约模具制造成本和时间。

VIP应用领域

- 船艇工业--船体，甲板，方向舵，雷达屏蔽罩
- 风电能源--叶片，机仓罩
- 体育休闲--头盔，帆板
- 汽车工业--各类车顶，挡风板，车厢
- 建筑领域--建筑物顶部部件，建筑模板
- 农业和园艺 --粮仓圆盖，农机保护盖



海洋石油平台上应用

- 01 复合材料格栅
- 02 玻璃钢扶手和梯子
- 03 液体管路系统
- 04 水或者燃料的储罐和容器
- 05 低压复合材料阀
- 06 玻璃钢缠绕管
- 07 拉力管
- 08 电缆支撑系统
- 09 隔墙板
- 10 高压储能瓶
- 11 柔性浮式钻管
- 12 水下结构部件
- 13 复合材料箱体、壳体
- 14 消防水和海水的抽水泵
- 15 复合材料筋
- 16 钻井平台的过渡接头
- 17 防火和防爆保护装备

2



船艇工业
中的应用





救生艇应用



Inshore IB1	2003	338 kg	4.95 x 2 m	25 knots	FRC structure with Hypalon coated polyester boat fabric
Atlantic 21	1972	1.4 tonnes	6.9 x 2.44 m	32 knots	GRP hull with hypalon-coated nylon tube
Atlantic 75	1992	1.5 tonnes	7.3 x 2.64 m	32 knots	GRP hull with hypalon-coated nylon tube
Mersey	1988	14 tonnes	11.77 x 4 m	16 knots	aluminium or fibre reinforced plastic
Trent	1994	27.5 tonnes	14.26 x 4.9 m	25 knots	fibre reinforced composite
Tamar	2005	30 tonnes	16 x 5 m	25 knots	fibre reinforced plastic (FRP)
Arun	1971	31.5 tonnes	16-17 x 5.43 m	18 knots	glass reinforced plastic
Severn	1996	41 tonnes	17x5.9 m	25 knots	fibre reinforced composite



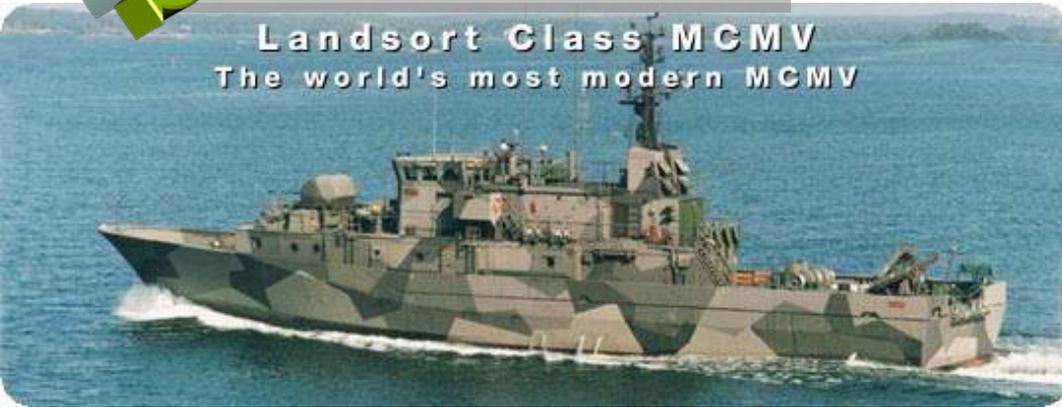
上层建筑



- HMS Wilton 1 1973 46 m 450 tonnes
- Royal Navy Hunt Class 13 1980 60 m 725 tonnes
- Sandown class SRMH 12 1989 50 m 450 tonnes



海军舰船



- Landsort MCMV 47.5 m 360 tons
 GRP sandwich
- Visby Class corvette 73 m 600 tons
 sandwich construction CFRP
 quoted speed of >35 knots



替艇及潜水器



- American nuclear submarine SSN 711 "San Francisco" hit an uncharted seamount on 7 January 2005.



- LR5 submersible used in the Kursk submarine rescue attempt has an advanced composite pressure hull



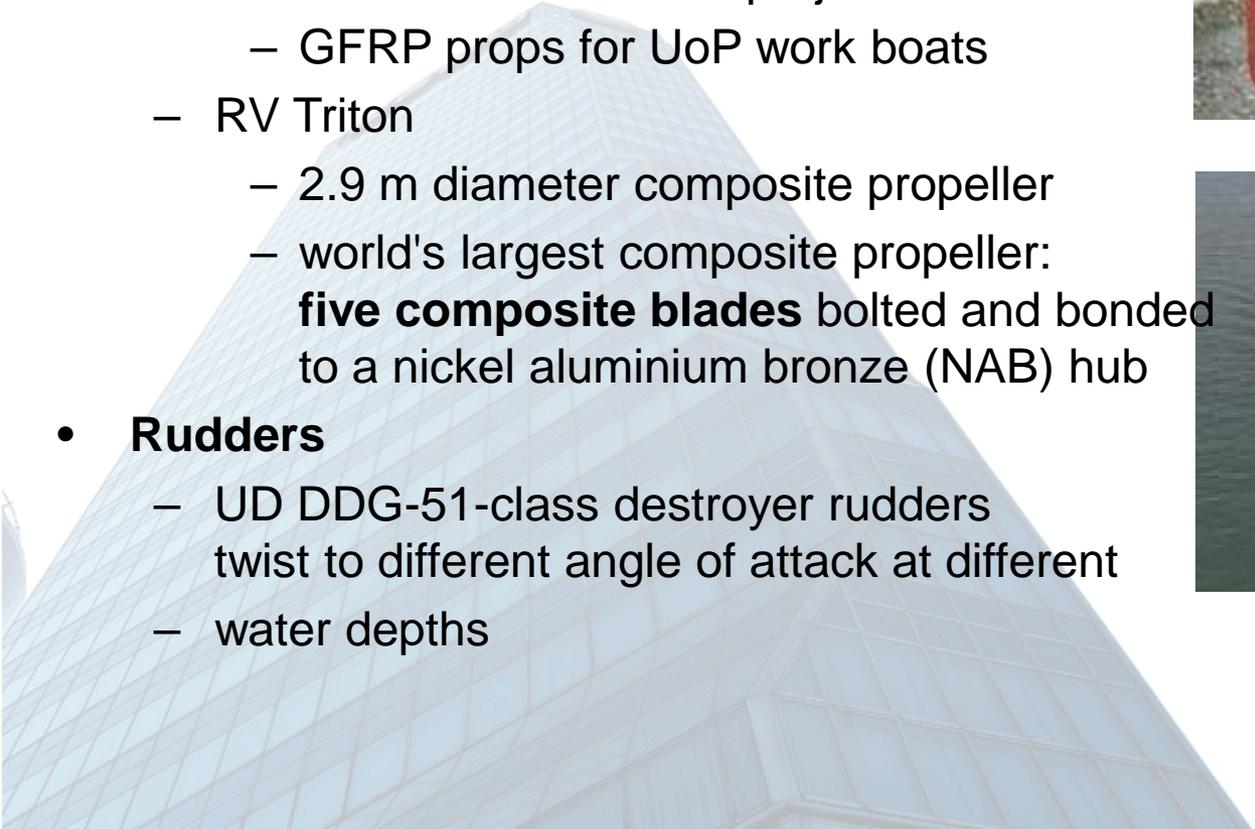
传动装置

- **Propellers**

- Tim Searle UG and PhD projects
 - GFRP props for UoP work boats
- RV Triton
 - 2.9 m diameter composite propeller
 - world's largest composite propeller: **five composite blades** bolted and bonded to a nickel aluminium bronze (NAB) hub

- **Rudders**

- UD DDG-51-class destroyer rudders twist to different angle of attack at different water depths





阳光动力船

- **Very Slender Vessels (VSV)** ~30 ft – covert operations
- **Cable & Wireless Adventure** 41 tonnes, 35 x 14 m
 - composite glass reinforced polymer/foam sandwich
 - record breaking circumnavigation:
24500 nautical miles in 74 days 20 hours
62 days at sea: average speed 16.5 knots
average fuel consumption ~ 1 mpg (4.5 l/nm).





- Alain Thébault built 18.3 m 6.5 tonnes vessel
- "**carbon fibre composite** and titanium structures"
- September 2009 in a 28-knot westerly wind
 - 51.36 knots (59.1 mph) over a distance of 500 metres
 - 48.72 knots (56 mph) over one nautical mile
 - subject to ratification by the World Sailing Speed Record Council (WSSRC).

Human-powered craft



- **Pink Lady Atlantic row**

- **carbon fibre/foam core sandwich** built in four separate components (10 meter hull, forward cabin roof, the aft cabin roof and the rowing bay)
- days from breaking a world record for the fastest North Atlantic row from Canada stopped by a freak wave

- **Knoydart 14' Prospector**

- standard **fibre glass** lay-up (24kg) is ideal for entry level paddlers
- Ultralight (18kg) lightest solo canoe available for wilderness tripping



