

铝 合 金

船体及上层建筑施工

顾 纪 清 编著

国防工业出版社

铝 合 金

船体及上层建筑施工

顾 纪 清 编著

国防工业出版社

内 容 简 介

本书比较系统地总结了铝合金船体及上层建筑施工的实际工作经验。书中首先介绍了铝合金材料特性及技术要求,接着详细地介绍了铝合金零、部件的号料、加工、热处理、防腐蚀处理、装配、铆接、焊接等技术工艺。对具有发展方向的蜂窝结构、胶粘结、涂胶防腐等技术也作了必要的介绍。本书着重分析和介绍了如何改进结构,采取防腐蚀工艺措施,增强铝合金结构防腐蚀能力,提高施工质量和延长使用年限的实践。可供从事铝合金施工的广大工人、技术人员、工艺员和管理人员阅读,也可供设计人员参考。

铝合金船体及上层建筑施工

顾 纪 清 编著

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

850×1168 $\frac{1}{32}$ 印张 8 $\frac{1}{8}$ 204千字

1983年9月第一版 1983年9月第一次印刷 印数: 0,001—1,330册

统一书号: 15034·2515 定价: 1.05元

前 言

随着科学技术的不断发展，用铝合金造船已经跨进了新的阶段。从几百吨的水翼艇、气垫船到几千吨的远洋货船；从水面舰艇到深潜器；从船体结构到上层建筑；从船舶舾装到航空母舰的飞机弹射器都广泛应用铝合金。

由于冶金工业的发展，新的耐蚀可焊的铝合金不断出现，建造铝合金舰船的结构也从铆接向焊接发展；从简单的手工氩弧焊趋向于熔化极脉冲氩弧焊。有些舰艇已开始采用胶粘技术；同时船体结构也作了很大改革，运用蜂窝结构及复合材料已显示了很大的优越性。近年来，在铝合金船体防腐蚀方面也有了新的进展，船体使用年限不断提高。铝合金材料由于重量轻、防磁以及低温性能好等独特的优点，可望在造船上得到新的发展。

我国在造船上应用铝合金也有 20 多年历史，积累了一定经验。但是工艺还不够普及，有些从事实际施工的工人、技术人员由于缺乏必要的资料，仍处于摸索之中；有的船员还采用钢质船体除锈的办法对付铝合金结构，把铝板保护层——阳极氧化膜刮得支离破碎，降低防腐效果。施工中采用的工艺及防腐措施不同，铝合金结构的使用年限相差悬殊。要提高铝合金船体使用年限，提高经济效益，普及工艺是非常必要的。有鉴于此，作者根据自己的实践和体会，吸收了外单位的经验并参阅了国外铝合金造船的技术资料而编写了此书。本书着重介绍铝合金船体及上层建筑施工的技术工艺，防止铝合金结构腐蚀的措施和途径，同时介绍了铝合金造船的发展动态，可供从事铝合金结构施工的技术人员、工人以及管理人员和设计人员参考。

在本书编写过程中，得到有关单位的热情支持和大力协助。又承蒙何增嘉、夏云鹏、郑建兴、唐予年等同志的校阅和帮助，谨在此表示感谢。

由于编者水平所限，书中可能存在缺点和不当之处，恳请读者批评指正。

目 录

第一章 铝合金在造船中的应用与发展	1
§1 应用范围	1
§2 应用历史	3
§3 发展与动向	7
第二章 船用变形铝合金	10
§1 船用变形铝合金的发展概况	10
§2 铝和铝合金	11
§3 船用铝合金的种类和特性	12
§4 变形铝合金的特性和用途	12
§5 铝合金板材技术条件与标准	19
§6 我国铝合金编号	22
§7 国外铝合金	25
§8 铝合金原材料保藏油封	33
第三章 划线号料	35
§1 划线场地及设备	35
§2 对材料的处理和要求	36
§3 划线	36
§4 正确掌握铝材状态注意下料程序	38
第四章 板和型材加工	40
§1 加工特点	40
§2 机械切割	43
§3 氩氢混合气体钨极电弧切割	49
§4 铝板折边	50
§5 加工外板	55
§6 舱柱加工	59
§7 冲压铝板	60
§8 加工横梁	67
§9 加工底肋骨	68
§10 舷边角铝的加工	71

VI

§11 铝镁合金角铝最小冷弯半径	72
§12 模具	73
第五章 铝质艇体腐蚀与使用寿命	74
§1 铝合金在海水中的腐蚀	74
§2 铝合金船体的腐蚀	77
§3 上层建筑的腐蚀	84
§4 铝合金防腐蚀工艺	86
§5 硬铝船体的使用寿命问题	87
第六章 船体零、部件热处理	89
§1 热处理设备	89
§2 热处理前的准备	94
§3 船用铝合金的退火	95
§4 变形铝合金的淬火	96
§5 变形铝合金的时效	102
§6 铝合金铆钉热处理	103
第七章 阳极氧化处理	105
§1 原理	105
§2 工艺过程	106
§3 检验	109
§4 几点说明	111
§5 缺陷种类及消除方法	111
§6 铝及铝合金的化学氧化处理	112
§7 化学氧化常见故障排除法	113
§8 铝合金焊缝氧化处理	114
第八章 铆接结构的装配	115
§1 建造方法	115
§2 初步装配	118
§3 铆钉孔的排列	119
§4 钻铆钉孔	125
§5 总装配	128
§6 铝合金铆接船体密封垫料	131
§7 密封材料安装工艺	133
§8 典型装配工艺及防腐措施	137

第九章 铆接	139
§1 铆钉种类	139
§2 铆钉成品的技术要求	141
§3 铆钉材料及工艺变革	142
§4 铆接设备及工具	145
§5 铆接方法	151
§6 铆接工艺顺序	158
§7 质量标准	160
§8 捻缝	164
§9 单面铆接	165
第十章 焊接	167
§1 铝合金及铝合金船体焊接特点	169
§2 可焊性分析	169
§3 焊前准备	170
§4 气焊	171
§5 氩弧焊	172
§6 装配	175
§7 分段划分	176
§8 分段装配	177
§9 矫正变形	178
§10 焊缝气孔和裂缝	180
§11 焊接接头的疲劳强度	182
§12 制造实例	183
第十一章 铝合金胶接	191
§1 胶粘结的基本原理	191
§2 胶接的优缺点	192
§3 胶接接头型式	193
§4 结构胶粘剂的分类	195
§5 胶粘剂的涂敷工艺	199
§6 胶焊工艺	200
§7 胶铆工艺	202
§8 胶粘连接的耐热性问题	203
§9 胶接技术在铝合金船上的应用	203

VIII

第十二章 铝合金船体的修理	208
§1 准备	208
§2 勘验	211
§3 更换原则	212
§4 修理基本方法	214
§5 排列壳板	217
§6 拆卸船体零、部件	217
§7 修理拆装原则工艺	218
§8 划线下料定位钻孔特点	220
§9 加工装配铆接特点	221
§10 修理后的航速	222
第十三章 防腐蚀	225
§1 包覆保护层	225
§2 油漆涂层	231
§3 牺牲阳极保护	238
§4 船体附件防腐蚀	240
第十四章 上层建筑施工	242
§1 结构的基本型式和工艺特点	242
§2 铝壁和钢围槛连接	244
§3 钢和铝扶强材连接	245
§4 钢、铝混合结构甲板的设计和施工	247
§5 铝合金上层建筑施工	248
§6 铝合金上层建筑修理	250
主要参考文献	251

第一章 铝合金在造船中的应用与发展

§1 应用范围

铝合金应用于造船已有 90 多年历史。由于铝合金材料比重小，无磁性以及有良好的低温性能等特点，用铝合金作为舰船及上层建筑材料，可以提高舰艇的战术、技术性能。对于民船来说，用铝合金建造船体和上层建筑，能增加载货量，提高稳性；或在同样的载货量和主机功率下，可以提高航速。

钢的比重 7.8 克/厘米^3 ，而铝合金的比重 $2.6 \sim 2.8 \text{ 克/厘米}^3$ ，只有钢的 $\frac{1}{3}$ 左右，因此铝合金材料早就引起船舶科技工作者的重视。

一般军用快艇，艇体重量约占总重量的 40% 左右，要想减轻艇体重量，选择铝合金材料是一个主要途径。在与钢等强度时，铝合金结构的重量约为低碳钢的 35~52%，在与钢等刚度时，铝合金结构的重量约为钢的 50%。可见，从减轻重量观点出发，铝合金很适宜制造船体、上层建筑及其它仓面属具。尤其是对于滑行艇、水翼艇、气垫船、冲翼艇更为适宜。因为这些艇，其重量对航速更敏感，也就是说，减轻船体重量能有效地提高航速。

中型舰艇的船体、大型舰艇的上层建筑采用铝合金同样十分有利。在减轻船体重量后，在同样主机功率下可以提高航速。现代舰艇航海仪器设备、武器装备的增加，使舰艇上部重量增加，稳性变坏。为了保证稳性，就必须减轻上部重量。比较有效的方法就是在上层建筑采用铝合金。

对于客船，从改善旅客的居住条件出发，扩大居住面积、增加上层建筑，也可能使稳性变坏。当然可以通过增加船宽来改善稳性，但又会影响航速，比较好的办法也是在上层建筑采用铝合金，可以在保持足够的稳性前提下，扩大上层建筑，达到改善居

住条件的目的。

同样，货船上层建筑以及船体改用铝合金材料，可以提高载货量，降低运输成本。

根据铝合金无磁性的特点，可以制造扫雷艇，潜艇以及特殊用途的防磁船舶。

根据铝合金具有良好的低温性能特点，可作为南北极作业考察船和运送液体甲烷的船舶。

铝合金材料在船上的应用有以下三个方面：

1. 一类结构方面的应用

所谓一类结构就是以强度为主要因素的受力构件。例如船体结构、大型舰船的甲板室、军舰的舰桥结构、导弹发射筒和深潜器外壳。

2. 二类结构方面的应用

二类结构，即不是承力构件或者受力不大的构件。如各种舾装件、铝质油柜、水柜、储藏柜、铝质水密门、窗、盖、卫生设备、管系、通风、挡风板、支架、流线型罩壳和扶手等。

3. 三类结构方面的应用

主要是装饰和绝热材料。利用铝阳极氧化处理后可以进行着色的特点，做成舱室装饰品。近年来日本制成了铝-聚乙烯（Al-PE）复合板，正在用作船舶及小艇内部装饰材料。铝材采用日本工业标准 JISA1100 所规定的产品，有部分则采用与 JISA3003、JISA5052 相当的铝材。两面是 0.1~0.3 毫米厚的铝层，中间的夹芯材料主要采用中低压聚乙烯（高密度聚乙烯）。铝板表面可以进行防腐、轧花、涂装、印刷等二次加工。这种复合板的特点是重量轻，有适当的刚性，能减振和隔音。日本海事协会已批准用于船舶内部装饰板材，也可作为门窗等材料。过去使用玻璃钢和木材之类材料的部位，均可用这种材料代替^{〔1〕}。

我国已制成塑料铝合金复合板，可作为舱室绝热和装饰。

铝合金还可作为武备材料。例如国外“鞑靼人式”超音速舰

对空导弹，应用了 135 公斤铝。“小猎犬式”导弹应用 10 多吨铝。“ASROC”反潜导弹是一种兼具鱼雷和深水炸弹作用的导弹，射程范围约 8 海里。此种导弹的发射架使用了大约 13.5 吨铝蜂窝结构。铝合金还用于探测仪器，例如声纳浮筒的许多零件⁽⁴⁾。

§ 2 应用历史

1. 铝合金在民船上的应用

一八九一年瑞士首次建造了铝质汽艇，以后其它国家相继建造了铝质艇体。但由于当时所冶炼铝合金的强度不足，耐腐蚀性差而限制了在造船上的应用。冶金工业是造船工业的先导，随着冶金工业的发展，本世纪 20 年代末冶金工业为造船工业提供了抗蚀性能较好的铝-镁合金，因此铝合金在造船上的应用又重新发展起来。

一九三一年八月英国建造了“地爱那Ⅱ”号 (DianaⅡ) 全铝游艇，材料是铝镁合金。该艇长 16.75 米，宽 3.66 米，吃水 1.74 米。使用了 20 多年以后，艇体仍然很好。一九五五年在伦敦铝合金展览会上展出了这艘游艇。在“地爱那Ⅱ”号之后，加拿大、瑞典、英国等又相继建造了一些铝合金小艇。由于铝合金材料用于造船，促使了水翼艇的发展。苏联在一九五八年建造了“拉克泰”号 (Ракета) 水翼客艇，载客 66 人，艇体材料硬铝。一九五九年又建造了载客 130~150 人的“梅焦尔”号 (Митер) 水翼客艇，船长 34.4 米，最大航速 80 公里/时，艇体材料用硬铝铆接。他们后来建造的水翼艇采用铝-镁合金焊接。一九六二年建造的“旋风”号 (Вихрь) 沿海水翼艇采用了把加强筋与板材轧成一个整体的新型板材，从而减轻了船体重量 10~15%。该艇长 46.5 米，宽 9.0 米，吃水 3.0 米，排水量 108 吨，动力 4800 马力，航速 50 节⁽²⁾。

一八七八年开始，铝合金材料已逐步用于大船上层建筑。这一年，一艘丹麦船用铝合金材料建造了甲板室。一九三九年，载

货量 8800 吨的挪威货船“弗恩浚浪脱”(Fernplant)号上层甲板、舷窗及栏杆都用铝合金制成,用去了 14 吨铝,省去了 40 吨钢。二次大战以后,随着冶金工业的发展,大船的上层建筑广泛应用铝合金,而且用量越来越大。一九五二年美国建造的“联合国”(United States)号邮船上总共使用了 2000 吨铝合金。该船长 305 米,宽 37 米,排水量 5914 吨,载客 2000 人。一九六〇年英国建造的“澳丽娜”(Oriana)号(排水量 40000 吨)和“堪培拉”(Canberra)号(排水量 48000 吨)上使用铝合金材料均超过 1000 吨^[8]。

铝合金材料还用于建造其它民用船舶。铝合金广泛用于建造油轮,英国建造的油轮,油舱内的衬板用 A-G4 铝-镁合金,每艘 30000 吨级的油轮用铝 1000 吨。一九五一年英国建造的“红玫瑰”(Red Rose)号渔船,用铝 27 吨。一九六四年匈牙利设计了一艘 100 吨全铝渔船,主要是采用含 2.5~4% 镁的铝合金建造。铝合金在驳船上也广泛应用。美国在一九六四年建造了一艘全铝驳船,应用了 180 多吨铝材。板材和挤压件是 5083 铝合金,比钢质驳船提高载货量 14%。铝合金在拖船上应用也很广泛,美国“索特”(Sauter)号拖船应用 5083 和 5086 铝合金全焊接结构建造,比钢壳拖船的建造工时减少 30%。苏联建造的火车渡轮也应用了 AMΓ5B、AMΓ6T 等铝镁合金,采用焊接结构。一九六三年英国建造了两条沼气运输船,船上的九个沼气仓是由铝合金焊制而成^[8]。本世纪七十年代,日本建造了大型铝质船舶“希霍库”(シーホーク)号,该船总长 45 米,型宽 7.8 米,型深 3.9 米,满载吃水 1.25 米,总吨位接近 400 吨,航速 30.18 节,船壳主体材料是耐腐蚀的 A5083 铝合金。外板、甲板、隔壁用 H32,为了减少焊接量,舷部角材、舳部角材是用模压的特种型材。

一九五八年我国首次建造了全铝铆接结构的水翼客艇——“长江水翼客艇”1 号,船体材料为硬铝。

一九六〇年我国建造的“昆仑”号内河客轮,首次采用铝合

金作为上层建筑。该船总长 84 米, 最大宽度 16 米, 深型 5.8 米, 设计吃水 2.4 米, 排水量 1712 吨。该船上甲板以上各层甲板及围壁都用 3.5~6 毫米厚的 Д16AT 硬铝制成, 共用了 93 吨铝合金。该船一九六二年出厂, 一九六五年改装, 一九七九年经过修理后, 至今仍在营运中。在万吨级远洋货轮舾装及装饰件施工中也应用了铝合金。用铝合金材料制造水密门、舱口盖、油、水柜等仓面属具, 已比较普遍。

2. 铝合金在舰艇上的应用

从十九世纪 20 年代起, 铝合金更广泛应用于军舰, 在建造护卫舰、航空母舰、潜艇等舰船时应用铝合金的例子很多。

一九二六年, 美国在军舰上大量应用铝合金。这是由于华盛顿海军条约对排水量的限制而迫切地需要减轻重量的缘故^[4]。当时两艘巡洋舰要改装成航空母舰, 因为担心超过条例的规定, 广泛研究用铝来减轻非结构件的重量。例如用铝制造通风系统、舱壁、飞行甲板栅栏、机场等。下面举一些舰艇采用铝合金的实例。

(1) 航空母舰、巡洋舰、驱逐舰 一九二八年美国在万吨级重型巡洋舰“盐湖城”号, 上层建筑和甲板舱室广泛应用杜拉铝(即硬铝, 牌号为 17S)。一九三三年美国开始把新型的铝-镁-硅-铬合金(牌号为 52S, 53E)等用在驱逐舰、巡洋舰和航空母舰的桥楼、甲板舱室、飞机发射架、升降舵、桅杆等结构。后来又发展了“60”系热处理强化合金用于甲板舱室、桅杆、升降舵等结构^[4]。

(2) 潜艇 在潜艇上也广泛应用铝合金。美国海军于一九六一年建造一艘调查用的深潜器“阿鲁明纳”(Aluminaut)号, 长度 15 米, 直径 2.4 米, 排水量 75 吨, 下潜深度 4500 米。艇体是用厚度为 165 毫米的 7079-T6 合金锻件制成^[4]。

(3) 鱼雷快艇 一九五一年~一九五六年苏联建造了“P4”铝壳鱼雷快艇, 材料是硬铝一九五一年服役, 共建造了 160~170 艘。一九五七年日本建成了“PT7”轻合金快艇。一九六二年又

建造了“PT10”鱼雷艇，航速 40 节。

(4) 巡逻艇、炮艇 一九五八年英国建造了“勇敢级”高速巡逻艇，结构是尖舭铝骨木壳，排水量 114 吨，航速 52 节。一九六四年苏联建造了 25 艘“普契拉”铝质巡逻艇，排水量 70~80 吨，航速 50 节。一九六六~一九七一年美国建成 14 艘“阿希维尔”(PGM-84)级高速炮艇，是第一批全铝军舰，标准排水量 225 吨，船长 50.2 米，船宽 7.2 米，吃水 2.9 米，航速 40 节。主甲板，壳板用 5086-H32 铝合金，型材用 5086-H112 铝合金。主甲板及船底板厚 12.7 毫米，该艇共用了 71 吨铝合金，全部用氩弧焊焊接。加拿大制造了“勃拉道尔”(FHE400)级反潜巡逻艇，排水量 212 吨，总长 46 米，艇宽 6.6 米，水翼航速 60 节，材料为铝合金，并广泛应用了具有纵桁的大型挤压板。一九六五年美国建造了“普冷维尤”(AGEH-1)号水翼艇，这是美国最大的反潜试验水翼艇。采用了钢制全浸式水翼，除水翼系统外，全部采用铝合金焊接联结方式，共用了 113.5 吨铝材，其中大型挤压件用了 90.8 吨，挤压件用 5456-H311，厚板用 5456-H321。该船长 64.66 米，宽 12.2 米，吃水 1.83 米，排水量 320 吨，航速 50 节⁽²⁾。

(5) 登陆艇 美国用铝合金建造了“LARC-15”登陆艇，船长 13.7 米，船宽 3.66 米，载重量 15 吨，水中航速 10 节，陆上航速 30 节，材料是 5086-H112 合金，焊接结构。并且还用了一些 5083-H112 和 6061-T6 合金。美国还建造了反潜和登陆用的气垫船“SKMR-1”全部用铝合金，船体主要用 5456 挤压件。

六十年代初，我国也成批建造了水翼快艇，艇体材料是 LY12CZ 铝合金。我国建造的导弹快艇，其上层建筑、围壁、发射筒和发射架外罩、炮座都用 LY12CZ 铝合金，钢质甲板中部的嵌补甲板以及仓内的仓壁、平台也广泛应用了铝合金。在炮艇、猎潜艇上层建筑以及中型舰艇的仓壁、仓面属具等也广泛应用了铝合金，有的还采用了铝镁合金焊接结构。

§ 3 发展与动向

可焊铝镁合金的出现,引起了造船界的注目,加上惰性气体保护焊技术焊接铝合金取得成效,在造船上采用全铝焊接结构日益增多。近年来国外发展铝合金造船有以下动向和特点。

1. 对铝合金材料的研究动向

国外趋向于选择 Al-Mg 合金作为船用材料,但又不满足于现有 Al-Mg 合金的机械性能和 Al-Mg-Si 合金的焊接性能,力图寻找既具有 Al-Mg 合金良好的焊接性能,又具有 Al-Mg-Si 合金高强度性能的新合金。国外研究动向对铝合金的应力腐蚀、断裂韧性、疲劳和疲劳裂纹的传播、铝合金强度和焊接性能等着重进行研究。并认为断裂韧性是安全设计中的重要因素,引起造船界的极大注意。在选择材料上,也有专门研究。从 Al-Mg 合金造船和使用中积累经验,以及对其“剥落”腐蚀和晶间腐蚀机理的研究结果,美国提出新的选材观点。即对于船体及其它重要结构,建议选择含镁量 3.5~4.5% 的 5086-H32 合金(屈服强度 20 公斤/毫米²)而对于含镁量为 4.7~5.5% 的 5456-H321 合金(屈服强度 24 公斤/毫米²),仅在要求强度较高的特殊情况下选用。

2. 工艺上的发展动向

国外铝合金船体及上层建筑已广泛采用焊接结构,焊接的特点是简化结构、减轻重量、节省工时、提高工效、改善劳动条件、减轻劳动强度。焊接结构还能提高结构的连接强度(比铆接提高 10~20%)。

焊接设备和工艺也在不断发展,非熔化极手工焊只用于焊接管子、扶手及零星部位。在船体建造中普遍采用自动与半自动熔化极焊。

3. 结构上的改革与发展

在建造铝合金船体时,广泛应用整体壁板,美、苏、加拿大等国家应用较早。美国建造的快艇,外板基本上都是用带数根加

强筋的整体壁板制成。苏联建造的水翼艇也应用这种新型轧制型材。这种新型板材是把加强筋与板材轧制（或挤压）成一个整体板材。它可以轧成平面状或挤压成管状，管状可沿母线切开，然后拉成平面状。苏联可生产周长为 1.5~2.0 米的管状板材，宽度为 1 米，最长可达 15 米，一般为 4~6 米。采用整体壁板，可以调整外板和纵梁上的厚度，使应力分布最合理，从而得到合理的结构，减轻重量、节约开支、避免骨架角焊所造成的变形。美国“普冷维尤”（GEH-1）号反潜水翼试验艇大量采用整体壁板，约占总用铝量的 80%，节省了几千尺焊缝，省工省料，有效地减少了焊接变形。

4. 有利于改善现代航空母舰和驱逐舰的速度、机动性、稳性及适航性

美国“独立”号（CVA-62）使用了大约 1122.5 吨铝合金，该舰减轻了 908 吨重量，大部分还只限于上层建筑的减轻，但已显著增强了抗击风浪的能力，特别是提高了在危险状态下的稳性^[2]。

现代驱逐舰也靠在上层建筑采用铝合金来减轻重量、保持稳性。许多新型驱逐舰主甲板以上的全部结构都是用铝合金制造。对于不同级的驱逐舰，在甲板以上结构中所用的铝量为：

护航驱逐舰 (DE)	51.756 吨
导弹驱逐舰领舰 (DLG)	167.072 吨
弹道导弹驱逐舰 (DDG)	105.836 吨
弹道导弹核动力驱逐舰领舰 (DLGN)	190.60 吨

美国海军第一艘弹道导弹驱逐舰领舰“杜威”（USS）号上层建筑应用了 167 吨铝，所选用的铝中，大约有 20% 左右是 5456-H321 和 5086-H112 合金。建造一艘驱逐舰所用的钢大约为 1900 多吨。用与钢壳驱逐舰等强度、等刚度设计的铝壳驱逐舰要用大约 980 吨铝合金，其重量可减轻 920 吨，在同样主机功率下，铝壳驱逐舰比钢壳驱逐舰航行速度更快^[4]。