

DOI: 10.13979/j.1007-7235.2015.09.001

## 船舶舰艇用铝及铝合金(2)

何健伟<sup>1</sup>, 王祝堂<sup>2</sup>

(1. 大连汇程铝业有限公司 辽宁 大连 116104; 2. 中国有色金属加工工业协会 北京 100814)

**摘要:** 本篇是全文的第二篇, 主要评述船舶舰艇用铝合金的化学成分、性能, 铝合金材料的状态, 舰船结构铝材的主要品种, 铝合金大型薄壁挤压型材, 舰船铝合金的特点, 铝合金舰船的腐蚀问题以及防腐蚀的措施等内容。

**关键词:** 舰船铝合金; 化学成分; 特点; 铝材品种; 铝合金腐蚀

中图分类号: TG146.21 文献标识码: A 文章编号: 1007-7235(2015)09-0001-12

## Aluminum and its alloys for ships and naval vessels(2)

HE Jian-wei<sup>1</sup>, WANG Zhu-tang<sup>2</sup>

(1. Dalian Hui Cheng Aluminum Industry Co., Ltd. Dalian 116104, China;

2. China Nonferrous Metals Industry Association, Beijing 100814, China)

**Abstract:** As the second part of the whole article, it has mainly reviewed chemical compositions, properties, tempers of aluminum alloy for ships and naval vessels, main varieties of vessel structure aluminum, large-sized thin-wall extrusion profiles of aluminum alloy, the characteristics of vessel aluminum alloy, its corrosive issues and measures against these issues.

**Key words:** aluminum alloy for ships and naval vessels; chemical composition; characteristics; variety of aluminum materials; corrosion of aluminum alloy

### 2 船舶舰艇铝合金<sup>[6-7]</sup>

铝合金可分为变形铝合金和铸造铝合金两大类, 其中变形铝合金在造船中应用更为广泛。

由于铝合金具有比强度高、耐海水腐蚀性能好、可焊接、易加工成形、无低温脆性、无磁性等特性, 在造船中应用可有效减轻舰船的质量、提高稳定性、增大航速等。因此, 当前铝合金在世界许多国家已成为舰船的主要结构材料之一。变形铝合金在各国造船中的应用, 从大型水面舰船上层建筑, 上千吨的全铝海洋研究船、远洋商船和客船的建造, 到水翼艇、气垫船、旅客渡船、双体客船、交通艇、登陆艇等各类

高速客船和军用快艇上都使用了一些变形铝合金。

铸造铝合金主要用于泵、活塞、艏装件及鱼水雷壳体等部件。

#### 2.1 舰船上铝合金的用量

目前, 铝在船舶舰艇制造中的用量不多, 就全世界来说, 其用量仅占2013年铝消费总量的1.7%左右。今后, 铝在船舶舰艇中的用量会有较大增长, 但2025年前的年平均增长率不会超过7.5%。

#### 2.2 舰船铝合金的化学成分

最早应用于船舶上的铝合金为含Ni的Al-Cu系合金, 继而采用的是2×××系铝合金, 但这些合金主要的缺点是抗腐蚀性能差, 因而也限制了在造船中

收稿日期: 2014-08-20

第一作者简介: 何健伟(1961-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 高级工程师。

的应用。

20 世纪 30 年代,采用 6061-T6 铝合金,并用铆接方法构造船体。40 年代,开发出了可焊、耐蚀的 5×××系铝合金,50 年代开始采用 TIG 焊接技术,这一时期铝合金在造船上的应用进展很快。20 世纪 60 年代,美国海军先后开发出 5086-H32 和 5456-H321 铝合金板材、5086-H111 和 5456-H111 铝合金挤压型材,由于采用了 H116 和 H117 状态,消除了沿晶沉淀网膜,解决了它们的剥落腐蚀和晶间腐蚀问题,这是 60 年代船用铝合金的开发取得的重大进步。随后,由于需要屈服强度更高的材料,于是在造船中又广泛应用了耐海水腐蚀性能良好的 6×××系铝合金,在较长的一段时间内,船体铝合金主要在 5×××系铝合金和 6×××系铝合金中选择。而苏联则较多地选择 2×××系铝合金作为快艇壳体材料。近些年来对 7×××系铝合金的研究日益

增多,并取得一些进展,已在造船中得到应用和发展。20 世纪 70 年代以后,船舶结构的合理化和轻量化越来越被重视,大型舰船的上层结构和舾装件开始大量使用铝合金。为此,这一时期开发出许多上层结构和舾装用铝合金,其中包括特种规格的挤压型材、大型宽幅挤压壁板和铸件等。

在日本主要用 5083、5086 及 6N01 铝合金,而结构上使用的几乎全为 5083 铝合金,但应控制镁的质量分数在 4.9% 以下,以防应力腐蚀开裂(SCC),但美国也用 5456 铝合金,其镁含量比 5083 铝合金的高,不过应采取防止应力腐蚀的热处理措施。

舰船用铝合金按用途可分为船体结构铝合金、舾装铝合金和焊接添加用铝合金,其 JIS 标准规定的化学成分如表 6 所示。表 7 所示为船体和舾装铝合金的特性。表 8 为其在船舶上的用途实例。

表 6 JIS 标准规定的船用铝合金化学成分(质量分数/%)

Tab. 6 Chemical compositions of aluminum alloy for vessels specified by JIS standard (wt/%)

| 类别                    | 合金                 | Si        | Fe    | Cu        | Mn        | Mg        | Cr        | Zn    | Ti         | Al |
|-----------------------|--------------------|-----------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|------------|----|
| 船<br>体<br>用           | 5051               | ≤0.25     | ≤0.40 | ≤0.10     | ≤0.10     | 2.2~2.8   | 0.15~0.25 | ≤0.10 |            | 余量 |
|                       | 5083               | ≤0.40     | ≤0.40 | ≤0.10     | 0.40~1.0  | 4.0~4.9   | 0.05~0.25 | ≤0.25 | ≤0.15      | 余量 |
|                       | 5086               | ≤0.40     | ≤0.50 | ≤0.10     | 0.20~0.7  | 3.5~4.5   | 0.05~0.25 | ≤0.25 | ≤0.15      | 余量 |
|                       | 5454 <sup>①</sup>  | ≤0.25     | ≤0.40 | ≤0.10     | 0.50~1.0  | 2.4~3.0   | 0.05~0.20 | ≤0.25 | ≤0.20      | 余量 |
|                       | 5456 <sup>①</sup>  | ≤0.25     | ≤0.40 | ≤0.10     | 0.50~1.0  | 4.7~5.5   | 0.05~0.20 | ≤0.25 | ≤0.20      | 余量 |
|                       | 6061               | 0.40~0.8  | ≤0.70 | 0.15~0.40 | ≤0.15     | 0.8~1.2   | 0.04~0.35 | ≤0.25 | ≤0.15      | 余量 |
|                       | 6N01               | 0.40~0.9  | 0.35  | ≤0.35     | ≤0.25     | 0.4~0.8   | ≤0.30     | ≤0.25 | ≤0.10      | 余量 |
|                       | 6082 <sup>①</sup>  | 0.7~1.3   | 0.50  | ≤0.10     | 0.40~1.0  | 0.6~1.2   | ≤0.25     | ≤0.20 | ≤0.10      | 余量 |
| 舾<br>装<br>用           | 1050               | ≤0.25     | 0.40  | ≤0.05     | ≤0.05     | ≤0.05     |           | ≤0.05 | ≤0.03      | 余量 |
|                       | 1200 <sup>②</sup>  | Si+Fe≤1.0 |       | ≤0.05     | ≤0.05     |           |           | ≤0.10 | ≤0.05      | 余量 |
|                       | 3203 <sup>②</sup>  | ≤0.6      | ≤0.70 | ≤0.05     | 1.0~1.5   |           |           | ≤0.10 |            | 余量 |
|                       | 6063               | 0.2~0.6   | ≤0.35 | ≤0.10     | ≤0.10     | 0.45~0.9  | ≤0.10     | ≤0.10 | ≤0.10      | 余量 |
|                       | AC4A <sup>③</sup>  | 8.0~10.0  | ≤0.55 | ≤0.25     | 0.30~0.6  | 0.30~0.6  | ≤0.15     | ≤0.25 | ≤0.20      | 余量 |
|                       | AC4C <sup>③</sup>  | 6.5~7.5   | ≤0.55 | ≤0.25     | ≤0.35     | 0.25~0.45 | ≤0.10     | ≤0.35 | ≤0.20      | 余量 |
|                       | AC4CH <sup>③</sup> | 6.5~7.5   | ≤0.20 | ≤0.25     | ≤0.10     | 0.20~0.40 | ≤0.05     | ≤0.10 | ≤0.20      | 余量 |
|                       | AC7A <sup>③</sup>  | ≤0.20     | ≤0.30 | ≤0.10     | ≤0.6      | 3.5~5.5   | ≤0.15     | ≤0.15 | ≤0.20      | 余量 |
| 焊<br>接<br>添<br>加<br>用 | 4043               | 4.5~6.0   | ≤0.80 | ≤0.30     | ≤0.05     | ≤0.05     |           | ≤0.10 | ≤0.20      | 余量 |
|                       | 5356               | ≤0.25     | ≤0.40 | ≤0.10     | 0.05~0.20 | 4.5~5.5   | 0.05~0.20 | ≤0.10 | ≤0.05~0.20 | 余量 |
|                       | 5183               | ≤0.40     | ≤0.40 | ≤0.10     | 0.50~1.0  | 4.3~5.2   | 0.05~0.20 | ≤0.25 | ≤0.15      | 余量 |

注: ①5454、5456 和 6082 铝合金的化学成分为国际标准规定的; ②1200 和 3203 铝合金中 Cu 的质量分数变为 0.05%~0.20% 时,即为 1100 和 3003 铝合金; ③AC4A 和 AC4C 铝合金中, Ni 和 Pb 的质量分数在 0.10% 以下, Sn 的在 0.05% 以下; AC4CH 和 AC7A 铝合金中, Ni、Pb 和 Sn 的质量分数都在 0.05% 以下; ④舾装铝合金还包括 5052 铝合金。

中国浙江巨科铝业有限公司生产的 5×××系船用铝合金板材的规格见表 9,而其性能则见表 10,由

于该公司的轧机为 1 850 mm 系的,因此板材的最大宽度为 1 700 mm,所生产的板材分别于 2012 年 6 月

及 9 月通过挪威船级社( DNV) 和中国船级社( CCS) 认证。

表 7 舰船用铝合金的特性和用途

Tab. 7 The characteristics and applications of the aluminum alloys for ships

| 类别 | 合金         | 品种和状态          |          |             | 特性                                                                | 用途                 |
|----|------------|----------------|----------|-------------|-------------------------------------------------------------------|--------------------|
|    |            | 板材             | 型材       | 铸件          |                                                                   |                    |
| 船体 | 5052       | O、H14、H34      | H112、O   |             | 中等强度 耐腐蚀性和成形性好 , 有较高的疲劳强度                                         | 上层结构 , 辅助构件 小船船体   |
|    | 5083       | O、H32          | H112、O   |             | 典型的焊接用铝合金 , 在非热处理型铝合金中 , 强度最高 , 焊接性、耐腐蚀性和低温性能好                    | 船体主要结构             |
|    | 5086       | H32、H34        | H112     |             | 焊接性和耐腐蚀性与 5083 铝合金的相同 , 强度稍低 , 挤出性有所改善                            | 船体主要结构 ( 薄壁宽幅挤压型材) |
|    | 5454       | H32、H34        | H112     |             | 强度比 5052 铝合金高 22% , 抗腐蚀性和焊接性好 , 成形性一般                             | 船体结构 , 压力容器 , 管道等  |
|    | 5456       | O、H321         | H116     |             | 类似 5083 铝合金 , 但强度稍高 , 有应力腐蚀敏感性                                    | 舱底和甲板              |
|    | 6061       | T4、T6          | T6       |             | 热处理可强化的耐蚀铝合金 , 强度高 , 但焊接缝强度低 , 主要用于不与海水接触的螺栓、铆接结构                 | 上层结构 , 隔板结构 框架等    |
|    |            |                | T5       |             | 中强挤压合金 , 强度比 6061 铝合金低 , 但耐腐蚀性和焊接性好                               | 上层结构 ( 薄壁宽幅挤压型材)   |
| 舾装 | 1050、1200  | H112、O、H12、H24 | H112     |             | 强度低 , 加工性、焊接性和耐腐蚀性好 , 表面处理性高                                      | 内装                 |
|    | 3003、3203  | H112、O、H12     | H112     |             | 强度比 1100 铝合金的高 10% , 成形性、可焊接性和耐腐蚀性好                               | 内装 , 液化石油气罐的顶板和侧板  |
|    | 6063       |                | T1、T5、T6 |             | 典型的挤压合金 , 强度低于 6061 铝合金 , 但挤压性能优良 , 可挤出截面形状复杂的薄壁型材 , 耐腐蚀性和表面处理性能好 | 容器结构 , 框架 , 桅杆等    |
|    | AC4A       |                |          | F、T6        | Al-Si-Mg 系热处理可强化铸造合金 , 具有高强度和高韧性 , 铸造性、耐腐蚀性和可焊接性好                 | 箱类和发动机部件           |
|    | AC4C、AC4CH |                |          | F、T5、T6、T61 | Al-Si-Mg 系热处理可强化铸造合金 , 具有良好的强度、韧性、耐腐蚀性和可焊性                        | 油压部件 , 箱类、发动机和电器部件 |
|    | AC7A       |                |          | F           | Al-Mg 系铸造合金 , 有良好的耐腐蚀性和阳极氧化性能 , 有较高的强度和韧性 , 铸造性较差                 | 舷窗 , 把手及其他船用部件     |
|    | AC8A       |                |          | F、T5、T6     | Al-Si-Cu-Ni-Mg 系铸造合金 , 具有良好的强度、耐热性、耐磨性和铸造性 , 热膨胀系数小               | 船用活塞               |

在舾装铝合金中 , 经阳极氧化处理的 6063-T5 铝合金挤压型材主要用于框架结构 , H14、H24 的工业纯铝和 3203 铝合金等的板材主要用于舱室内壁等内装结构 , 铸造性能优良的 AC4A 和 AC4C 铝合金铸件主要用于舾装件。AC7A 铝合金具有很强的抗腐蚀性能 , 可望在舰船中应用 , 但它的铸造性能较差 , 铸件成本很高 , 在船舶上的使用少。

中强 Al-Zn-Mg 系铝合金热处理后的强度和工艺性能比 Al-Mg 系铝合金的还优越 , 并且可焊和有

一定的抗蚀性 , 受到造船业的青睐。例如舰艇的上层结构可以用 7004 和 7005 铝合金 , 装甲板可用 7039 铝合金。此外该系合金还可以用来制作涡轮、引导装置、容器的顶板和侧板等。但无铜的 Al-Zn-Mg 系合金的缺点是对 SCC 较为敏感 , 而且焊缝对 SCC、剥落腐蚀和存放裂纹也较为敏感。

目前 , 在船壳体结构上用的铝合金主要是 5083、5086 和 5456 , 它们的力学性能、耐腐蚀性和可焊接性能都很好。挪威船业协会规定使用 5454 铝合金 ,

表8 铝合金在船舶上的用途实例

Tab. 8 The example of the use of aluminum alloy in vessels

| 用途                   | 合金                                              | 产品类型              |
|----------------------|-------------------------------------------------|-------------------|
| 船侧、船底外板 <sup>①</sup> | 5083、5086、5456、5052                             | 板、型材 <sup>③</sup> |
| 龙骨                   | 5083                                            | 板                 |
| 肋板、隔壁                | 5083、6061                                       | 板                 |
| 肋骨                   | 5083                                            | 型板、板              |
| 发动机台座                | 5083                                            | 板                 |
| 甲板 <sup>①</sup>      | 5052 <sup>②</sup> 、5083、5086、<br>5456、5454、7039 | 板、型材 <sup>③</sup> |
| 操纵室                  | 5083、6N01、5052                                  | 板、型材 <sup>③</sup> |
| 舷墙                   | 5083                                            | 板、型材              |
| 烟筒                   | 5083、5052                                       | 板                 |
| 舷窗                   | 5052、5083、6063、AC7A                             | 型材、铸件             |
| 舷梯                   | 5052、5083、6063、6061                             | 型材                |
| 桅杆                   | 5052、5083、6063、6061                             | 管、棒、型材            |
| 海上容器结构材料             | 6063、6061、7003                                  | 型材                |
| 海上容器顶板和侧板            | 3003、3004、5052                                  | 板                 |
| 发动机及其                | AC4A、AC4C                                       | 铸件                |
| 他船舶部件                | AC4CH、AC8A                                      |                   |

注: ①日本渔船协会规定, 船长大于 12 m 和船外板和露天甲板只限使用 5××× 系铝合金; ②渔船所使用的 A5052P-H112 铝合金花纹板; ③大型宽幅挤压型材。

其板材的抗拉强度与 5086 铝合金的相同。而美国则主要采用 5456 铝合金, 但最近在高速艇上使用 5086-O 铝合金板材和 5086-H111 铝合金挤压型材。

Al-Mg-Si 系合金由于在海水中会发生晶间腐蚀, 所以主要用于船舶的上部结构。日本在舰船的上部结构中使用 6N01-T5 铝合金, 而美国则用 6061-T6 铝合金大型薄壁型材。

表9 巨科铝业有限公司生产的舰船铝合金板材规格

Tab. 9 Dimensions of aluminum alloy sheets produced by Juke Aluminum Industry Co., Ltd.

| 合金   | 状态   | 厚度/mm     | 宽度/mm |
|------|------|-----------|-------|
| 5052 | O    | 3~50      | ≤1700 |
|      | H32  | 3~8       | ≤1700 |
|      | H34  | 3~6       | ≤1700 |
| 5083 | O    | 3~50      | ≤1700 |
|      | H112 | 3~17      | ≤1700 |
|      | H321 | 3~8       | ≤1700 |
|      | H34  | 3~6×≤1700 |       |
| 5754 | O    | 3~50      | 1700  |
|      | H32  | 3~8       | 1700  |
|      | H34  | 3~6       | 1700  |

表10 浙江巨科铝业有限公司主要船舶用铝合金的力学性能

Tab. 10 Mechanical properties of main varieties of aluminum alloy for vessels produced by Juke Aluminum Industry Co., Ltd. in Zhejiang

| 合金-状态     | 厚度<br>mm | 抗拉强度/(N·mm <sup>-2</sup> ) |     | 屈服强度/(N·mm <sup>-2</sup> ) |     | 伸长率/%               |      |
|-----------|----------|----------------------------|-----|----------------------------|-----|---------------------|------|
|           |          | 标准值 GB/T3880.2-2006        | 实测值 | 标准值 GB/T3880.2-2006        | 实测值 | 标准值 GB/T3880.2-2006 | 实测值  |
| 5052-O    | 50       | 170~215                    | 188 | ≥70                        | 104 | ≥18                 | 26   |
| 5052-O    | 40       | 170~215                    | 191 | ≥70                        | 102 | ≥18                 | 28.5 |
| 5052-H32  | 8.0      | 210~260                    | 215 | ≥130                       | 148 | ≥10                 | 20.0 |
| 5052-H32  | 6.0      | 210~260                    | 235 | ≥130                       | 205 | ≥10                 | 14.5 |
| 5052-H34  | 5.0      | 230~280                    | 235 | ≥150                       | 194 | ≥7                  | 10.5 |
| 5052-H34  | 4.0      | 230~280                    | 270 | ≥150                       | 215 | ≥7                  | 9.5  |
| 5754-O    | 50       | 190~240                    | 235 | ≥80                        | 133 | ≥17                 | 25.0 |
| 5754-O    | 25       | 190~240                    | 225 | ≥80                        | 115 | ≥17                 | 26.0 |
| 5754-H32  | 8.0      | 220~270                    | 235 | ≥130                       | 140 | ≥10                 | 25.0 |
| 5754-H32  | 4.0      | 220~270                    | 235 | ≥130                       | 131 | ≥10                 | 20.5 |
| 5754-H34  | 3.0      | 240~280                    | 245 | ≥160                       | 160 | ≥10                 | 23.5 |
| 5083-O    | 60       | 275~350                    | 295 | ≥125                       | 141 | ≥14                 | 22.0 |
| 5083-O    | 25       | 275~350                    | 290 | ≥125                       | 141 | ≥14                 | 23.0 |
| 5083-H112 | 25       | ≥275                       | 295 | ≥125                       | 139 | ≥10                 | 21.0 |
| 5083-H112 | 8.5      | ≥275                       | 290 | ≥125                       | 130 | ≥10                 | 25.5 |
| 5083-H321 | 8.0      | 305~385                    | 305 | 215~295                    | 295 | ≥12                 | 17.8 |
| 5083-H321 | 4.0      | 305~385                    | 340 | 215~295                    | 215 | ≥12                 | 23.5 |
| 5083-H34  | 6.0      | ≥340                       | 365 | ≥270                       | 330 | ≥5                  | 9.5  |
| 5083-H34  | 3.0      | ≥340                       | 345 | ≥270                       | 270 | ≥5                  | 13.5 |

### 2.3 材料状态

铝合金的状态标志着材料的加工方法、内部组织和力学性能等,一般工程上根据用途不同而采用不同状态的材料。下面着重介绍船用铝合金的状态代号表示的含义。

表 11 所示为铝合金的基本状态,船体结构用的 5××× 系铝合金采用 O 和 H 状态,6××× 系铝合金采用 T 状态,AC 系铸造铝合金采用 F 和 T 状态。

表 11 铝合金的基本状态代号和定义  
Tab. 11 Basic designations and definitions of aluminum alloy tempers

| 代号 | 定义与内容                                                       |
|----|-------------------------------------------------------------|
| F  | 原加工状态。如热轧状态、热挤压状态,以及铸造状态等。适用于不控制热状态或加工硬化的成形加工产品,对其力学性能不加以限制 |
| O  | 退火状态。适用于退火得到最低强度的变形产品和用退火改善塑性和尺寸稳定性的铸件                      |
| H  | 加工硬化状态。适用于用加工硬化来提高强度,随后进行或不进行会降低部分强度的辅助热处理的产品               |
| T  | 通过固溶处理与时效处理的稳定状态。适用于通过固溶热处理,随后进行或不进行辅助加工硬化都能达到稳定状态的产品       |

注: ① H1n—只冷作硬化状态, H2n—冷作硬化加部分退火, H3n—冷作硬化加稳定化处理; ② n=2 为 1/4 硬状态, n=4 为 1/2 硬状态, n=6 为 3/4 硬状态, n=8 为全硬状态, n=9 为超硬状态。

船体结构用 5××× 系铝合金采用 H 状态的细目如表 12 所示,这是按日本 JIS 标准规定列出的。在日本,渔船一般使用 A5083P-O 和 A5083S-H112 铝合金,高速艇等使用 A5083P-H32 铝合金。P—板材(plate),S—型材(section)。

美国采用“形变退火法”生产 5083 和 5456 铝合金材料,即将热轧和退火的合金在某一温度下进行冷变形和低温退火的合金在某一温度下进行冷变形和低温退火,以保证  $\beta$  相的均匀分解。利用这种工艺可分别生产出 H321、H323、H343、H116 和 H117 状态的 Al-Mg(4%~8%) 合金,其生产方案为:

- ①在 425℃~565℃ 均匀化退火;
- ②在 315℃~425℃ 热轧和退火;
- ③冷却后在 260℃ 以下冷变形( $\varepsilon > 20\%$ );
- ④冷作后在 205℃~275℃ 退火 2 h~24 h,使  $\beta$  相均匀沉淀;

⑤为了提高强度还可以进行 10%~80% 冷变形。

舰艇船舶上层结构和隔壁结构用的 6××× 系铝

合金以及舾装用的铸造铝合金所用的状态代号如表 13 所示。

表 14 所示为各国船体结构用铝合金的状态比较。

表 12 船体结构用 5××× 系铝合金 H 状态代号的细目<sup>[3]</sup>

Tab. 12 The detailed list of 5000 series aluminum at H temper for hull structure<sup>[3]</sup>

| 代号                 | 内容                                          |
|--------------------|---------------------------------------------|
| H111 <sup>①</sup>  | 退火后,进行冷加工(轧制或矫直)                            |
| H112               | 挤压状态或热轧后的原始状态。但对材料的力学性能有要求,需做力学性能实验         |
| H116 <sup>②④</sup> | 冷加工低温退火,以改善材料的抗剥落腐蚀性能                       |
| H14                | 抗拉强度介于 O 状态和 H18 状态之间(1/2 硬状态)              |
| H311               | H31 加小的冷加工状态                                |
| H32                | 抗拉强度介于 O 状态和 H34 状态之间(冷加工后,进行稳定化处理。1/4 硬状态) |
| H321 <sup>③</sup>  | H32 加小的冷加工状态                                |
| H323 <sup>④</sup>  | 特殊的加工状态,改善了 H32 的抗应力腐蚀开裂能力(1/4 硬状态)         |
| H34                | 抗拉强度介于 O 状态和 H38 状态之间(冷加工后,进行稳定化处理。1/2 硬状态) |
| H343 <sup>④</sup>  | 特殊的加工状态,改善了 H34 的抗应力腐蚀开裂能力(1/2 硬状态)         |

注: ① ASTM B 221M-89 规定的 5083、5086 和 5456 铝合金的挤压型材、管、棒和线; ② ASTM B 209M-89a 规定的 5083、5086 和 5456 铝合金板材,美国暂定联邦标准 QQ-A-00250/19 (Navy-ships) 规定的 5086 铝合金板材; ③ 同上(5083、5456 铝合金)以及 JIS H4000 规定的 5083 铝合金板材; ④ 美国暂定联邦标准 QQ-A-00250/20 (Navy-ships) 规定的 5456 铝合金板材。

表 13 船用 6××× 系铝合金和 AC 系铸造铝合金的状态代号

Tab. 13 Temper designations of 6000 series aluminum alloy and AC casting alloy for vessels

| 状态  | 定义和内容                                                   |
|-----|---------------------------------------------------------|
| T1  | 高温热加工冷却后,自然时效状态。适用于热挤压的不进行冷加工的材料,或矫直等冷加工对其标定力学性能影响很小的产品 |
| T4  | 固溶处理后,自然时效状态。适用于固溶处理后不进行冷加工产品,或冷矫直加工对其标定力学性能影响很小的产品     |
| T5  | 高温热加工后,人工时效状态。适用于高温成形后不进行冷加工的产品,或矫直冷加工对其标定力学性能影响很小的产品   |
| T6  | 固溶处理后,人工时效状态。适用于固溶处理后不进行冷加工,或矫直等作业对其标定力学性能影响很小的产品       |
| T61 | 在热水中进行 T6 处理,适用于铸件                                      |

表 14 各国舰船用铝合金的状态比较

Tab. 14 Temper comparison among aluminum alloys for ships and naval vessels built by various countries

| 合金                   | 日本渔船协会          |           | 挪威船业协会                           |      | 美国联邦暂定标准<br>QQ-A-00250/19 20                     | 美国小型舰船            |      |
|----------------------|-----------------|-----------|----------------------------------|------|--------------------------------------------------|-------------------|------|
|                      | 板材              | 型材        | 板材                               | 型材   | 板材                                               | 板材                | 型材   |
| 5052                 | O<br>H14<br>H34 | H112<br>O |                                  |      | H34                                              |                   |      |
| 5083<br>( AlMg4.5Mn) | O<br>H32        | H112<br>O | A <sup>①</sup><br>B <sup>①</sup> | H112 |                                                  | H116、H321         |      |
| 5086<br>( AlMg4)     |                 | H112      | A <sup>①</sup><br>B <sup>①</sup> | H112 | O、H112、H116、H34、H36、H38                          | H112、H116、H32、H34 | H112 |
| 5454<br>( AlMg3Mn)   |                 |           | A <sup>①</sup><br>B <sup>①</sup> | H112 |                                                  |                   |      |
| 5456                 |                 |           |                                  |      | O、H112、H116、H323 <sup>②</sup> 、H343 <sup>②</sup> |                   |      |
| 6061                 |                 | T6        |                                  |      |                                                  | T4、T6             | T6   |
| 6N61                 |                 | T5        |                                  |      |                                                  |                   |      |
| 6082<br>( AlMgSi)    |                 | T4<br>T6  | T4<br>T6                         |      |                                                  |                   |      |

注: ①A 为 1/2 硬状态, B 为 1/4 硬状态; ②ASTM B 209-89 无规定, 同标准规定 5456 铝合金状态有 O、H321、H112、H116 和 F。

## 2.4 舰船结构铝材的主要品种

舰用铝合金产品的主要品种是板材、型材、管材、棒材、锻件和铸件。

### 2.4.1 板材

通常使用的板材有 1.6 mm 以上的薄板和 30 mm 以上的厚板。为减少焊缝, 常使用 2.0 m 宽的铝板, 大型船则使用 2.5 m 宽的铝板, 长度一般是 6 m, 也有按造船厂合同使用一些特殊规格的板材。为防滑, 甲板采用花纹板。

### 2.4.2 型材

舰船用的型材有以下几种:

- 1) 高 40 mm ~ 300 mm 的对称圆头扁铝材;
- 2) 高 40 mm ~ 200 mm 的非对称圆头扁铝材;
- 3) 厚 3 mm ~ 80 mm, 宽 7.5 mm ~ 250 mm 的扁铝材;
- 4) 高 70 mm ~ 400 mm 的同向圆头角铝材;
- 5) 高 35 mm ~ 120 mm 的反向圆头角铝材; 15 mm × 15 mm ~ 200 mm × 200 mm 的等边角铝材;
- 6) 20 mm × 15 mm ~ 200 mm × 120 mm 的非等边角铝材;
- 7) 凸缘 25 mm × 45 mm, 腹板 40 mm × 250 mm 的槽铝材;
- 8) 60 × 200 × 8/5, 60 × 150 × 5/4 左右的 T 型

铝材。

除上述的一些常规型材外, 舰船也使用一些特殊型材, 还使用把加强筋与板材轧制(或挤压)成一个整体壁板, 它可以轧成平面形状或挤压成管状, 管状可沿母线切开, 然后拉成平面状。舰船使用的整体挤压壁板与飞机上用的相比, 筋高、筋间距大, 宽度 1 m ~ 2 m, 长 4 m ~ 6 m, 最长可达 15 m。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, 减轻质量, 减少焊接缝数量和减小焊接后翘曲程度。

### 2.4.3 管、棒及其他

在舰船上, 通常用小直径铝合金管材制造管道, 而大直径管材则用做船体、上层结构、桅杆的各种构件、梁柱(中空圆筒柱、中空角形柱)等。常用的管材外径 16 mm ~ 150 mm, 管壁厚 3 mm ~ 8 mm。在对管路用管进行厚度选择时, 既要考虑强度, 又要注意腐蚀介质的影响程度。

棒材用直径 12 mm ~ 100 mm 的 5052、5056 和 5083 铝合金棒。锻件和铸件在舰船上的用量相对较少。主要用做一些机器构件。

中国船用铝合金的研究 20 世纪 50 年代开始规划, 60 年代以后形成船艇及装甲板用的铝合金系列, 如 LF 系(相当于 5 × × × 系)、LD30、LD31、919 铝合

金、147 铝合金、北航研制的 4201 铝合金(与含 7% Mg 的 5090 铝合金相当)和东北轻合金加工厂研制的 180 铝合金(也称 2103 铝合金,与 5456 铝合金相当)这种合金轧制难度较大,成品率较低;21 世纪以来已与国际接轨,多采用 5083 铝合金。

## 2.5 舰船铝合金的特点

制造船舶舰艇使用铝合金具有的优点是:密度小,质量轻;强度/密度比值大,约为钢的 2~5 倍;对海水有相当强的抗腐蚀性;可焊性也令人满意,特别是有优秀的摩擦搅拌焊接性能;良好的可成形性能;可以挤制形状复杂的中空薄壁型材与宽大壁板;无低温脆性,强度与伸长率随温度降低而均衡地上升;无磁性。

尽管铝合金有以上诸多优点,但在设计选材时应注意与充分考虑铝合金的以下事项:纵弹性模量仅约为钢的 1/3;热导率约为钢的 2 倍;热膨胀系数约比钢的大 1 倍;常规焊接时的变形大,但在摩擦搅拌焊接时,几乎不发生变形;电极电位低,在海水中如接触异种金属会发生电解腐蚀,必须采取严密的防腐蚀措施;硬度不高,表面易受损伤;疲劳强度低,应避免应力集中(图 13)<sup>[3]</sup>;熔点比钢的低得多,仅为钢的 1/2。

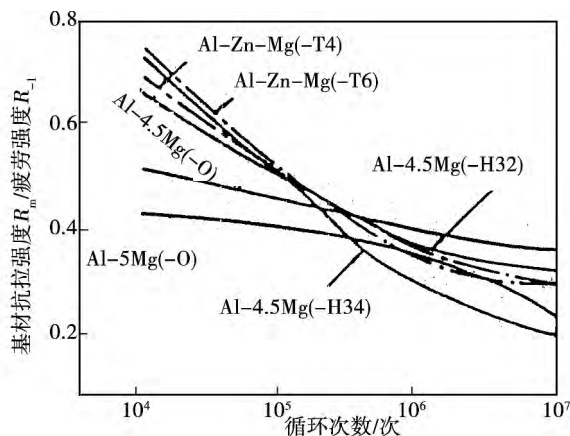


图 13 舰艇铝合金的  $R_m/R_{-1}$  与循环次数的关系

Fig. 13  $R_m/R_{-1}$  of aluminum alloy for ships and naval vessels as a function of cycle index

由于铝的密度低,比强度大,在制造高速舰艇方面有着独特的优势,与钢壳舰艇相比,在强度相等情况下,以铝合金结构质量约为钢结构的 50% 为妥。据计算,在制造一艘长 30 m、速度 56 km/h 的船时,铝合金船的装机功率为  $1\ 671 \times 2\ \text{kW}$ ,玻璃钢(FRP)船的为  $2\ 014 \times 2\ \text{kW}$ ,而钢船的则高达  $1\ 641 \times 3\ \text{kW}$ 。而且 FRP 与钢船的动力机舱室要比铝合金船的约大

12%~25%,也就是说在性能相同时,铝船的造船成本、燃料费、维护费用等都比 FRP 和钢船的低一些,同时铝船报废后的可回收性比它们的强得多,铝船对环境的友好性也比它们的强。

舰船铝合金的性能依成分、状态的不同而有较大差别,在设计选材与强度校核时表 15 所列的强度可供参考,也可以按有关标准进行。

表 15 铝合金船结构选材时的参考性能

Tab. 15 Selection of aluminum alloy materials for hull structure

| 铝合金                    | 抗拉强度<br>$\text{N/mm}^2$ | 屈服强度<br>$\text{N/mm}^2$ | 焊接部位屈服强度<br>$\text{N/mm}^2$ |
|------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| 5083-O                 | 277                     | 127                     | 127                         |
| 5083-H112              | 277                     | 108                     | 127                         |
| 5083-H32               | 304                     | 216                     | 127                         |
| 6N01-T6                | 245                     | 206                     | 98                          |
| 5456-H116 <sup>①</sup> | 304                     | 216                     | 179                         |

注:①美国 ASTM 标准,其他的为日本 JIS 标准。

设计铝合金船时对铝合金疲劳强度较低与对应力集中敏感必须予以足够的注意。因为铝的应力扩展系数与其正弹性模量平方根成比例,其疲劳强度比钢的低。通过热处理改变铝合金的状态可以提高其抗拉强度与屈服强度,可是它的疲劳强度并未得到相应的提高。图 14 表示铝合金的疲劳强度与抗拉强度的关系<sup>[3]</sup>。因此,对船体部位受负载次数多的部位的选材应予以充分考虑。

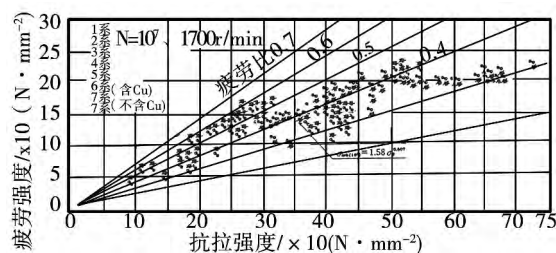


图 14 铝合金的疲劳强度与抗拉强度的关系(砂布抛光试样)

Fig. 14 Fatigue strength versus tensile strength of aluminum alloy

## 2.6 铝合金大型薄壁挤压型材

6×××系的 6063、6N01、6082 铝合金等有着优秀的可挤压性能,可以挤制宽薄带肋壁板,可用于制造舰船外板、甲板等,可简化制造工艺与进一步减轻结构质量,同时可以减少焊接变形与易于组装。中国拥有世界上最多的大挤压机,2013 年底有 45 MN~

160 MN 的大挤压机 86 台,其中有从德国西马克集团梅尔公司引进的 150 MN 的( 充矿轻合金有限公司) 与 160 MN 的( 利源铝业有限公司) 各 1 台,可挤压宽度达 1 100 mm 的特大型材。2016 年还将拥有 225 MN 的超大挤压机,可挤压更宽的型材,用两三块这样的型材即可焊成一条小型舰船的壳体。太重锻压设备分公司于 2013 年年末在太重天津滨海基地制造的世界最大的 225 MN 挤压机进入设备整合集成阶段。

日本挤压铝材产业挤出的 II 形型舰船铝型材及其他型材断面如图 15、16、17 所示,造船产业利用这些型材精心设计,制造出结构合理的质量更轻的铝合金舰船。这种 II 形型材的“底板”上有 2 个高的肋,“底板”是变断面的,中间部分薄一些,与肋(筋)连接部分增厚一些,因而应力分布均匀,实现质量最大轻量化。

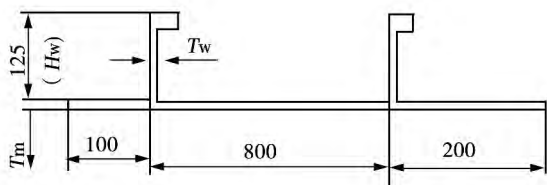


图 15 II 形挤压舰船铝型材

Fig. 15 Extruded aluminum profiles for ships and naval vessels with the shape like “II”

日本在建造铝合金舰船时值得我们借鉴的经验,不是把眼睛盯在高强度材料上,而是采用结构合理的大型材,在结构质量与强度相等情况下,可以达到最大轻量化。他们在制造全长 66 m,满载排水量 770 t 的水翼船的船底时,原设计采用 5456-H116 铝合金(屈服强度为 167 N/mm<sup>2</sup>),后改用易生产的价格较低的 5083-H112 铝合金(屈服强度为 110 N/mm<sup>2</sup>) II 形型材,船底质量减轻 75%<sup>[3]</sup>,同时制造工艺简单,维修方便,取得了可观的经济效益。

### 3 铝合金舰船的腐蚀<sup>[1]</sup>

纯铝的化学性质很活泼,因为其标准电位很负(只有 -1.67 V),但由于它能与空气中的氧生成紧密而钝化的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜。这层致密的保护膜隔绝了空气,阻碍了继续氧化,所以纯铝具有良好的抗蚀性。但是纯铝强度太低,不可能用作船体材料,在纯铝中加入合金元素,例如 Al-Mg 合金、Al-Cu 合金等可以作为造船铝合金。但是铝不论用作船体哪个部

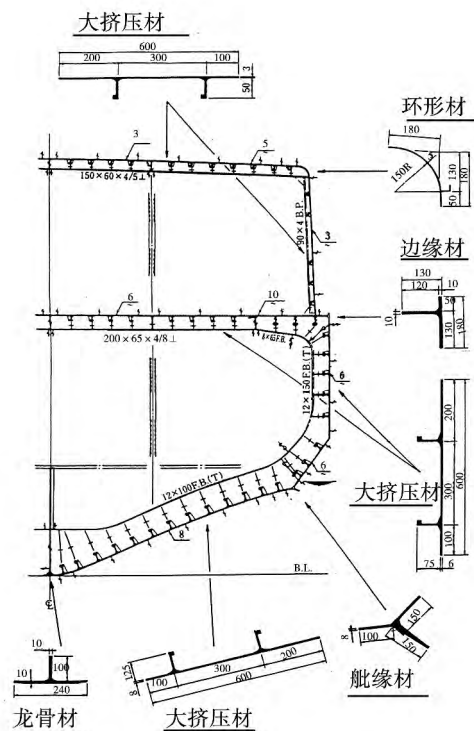


图 16 铝合金船体结构

Fig. 16 The hull structure of aluminum alloy

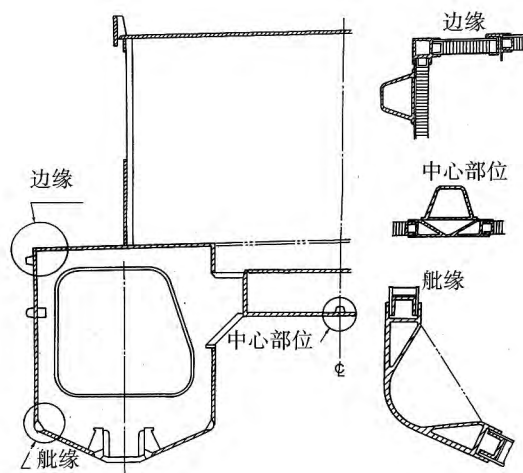


图 17 日本全铝拖网渔船野菊花 VII 号的中心横断面结构

Fig. 17 The central cross-section structure of Wild Chrysanthemum VII, an all aluminum trawler of Japan

位都或多或少会与海水接触或受到海水飞沫的侵袭。

海水是一种良好的电解液。海水中氯离子含量很高,使它对于大多数金属结构都会产生腐蚀。同时海洋的掀波和自然对流,进行经常不断的机械搅拌,使得表层海水充气而被氧所饱和。因此海水在金属-液体这两个相界上的腐蚀通常很强烈。铝



合金虽然在空气中具有自钝化的能力,但是在海水中,氯离子能破坏铝的保护膜,使铝合金产生腐蚀。

2000 年以前,船体还有用 2024 型铝合金制造的,现在则几乎全用  $5 \times \times \times$  系的 5083 铝合金制造,上层建筑等则多用  $5 \times \times \times$ 、 $6 \times \times \times$ 、 $3 \times \times \times$  及  $7 \times \times \times$  (不含 Cu) 系铝合金制造。

在美国 1955 年开始用 5083 铝合金焊接拖轮 (tug),首条长 16.8 m,往返于海湾-大西洋群岛,以后又焊制一批长 4.2 m ~ 45 m 的全铝工作艇、拖网渔船、军用与美国警卫队巡逻艇以及为在墨西哥湾石油钻井平台服务的船、旅客渡船与游览船。直到 2005 年为止的 50 年内这些铝合金船仅发生两起严重的腐蚀事件<sup>[10]</sup>。一起发生于 1968 年在越南内河服务的一艘高速巡逻艇的艇体发生了严重的剥离腐蚀,美国铝业协会腐蚀技术委员会对这起腐蚀作了深入的研究,认为是由于 5083 铝合金厚板加工工艺与热处理不当造成的,形成了不好的显微组织,晶粒边界有连续的沉淀相  $Mg_2Al_3$ ,引起电池反应,造成晶界腐蚀。他们认为,材料显微组织形貌也对这种腐蚀起了相当大的加速作用,厚板的晶粒沿轧制方向被拉得长长的,断面上也就是说整个厚板为非再结晶组织是产生剥离腐蚀的温床,如果为等轴的再结晶组织则仅发生点腐蚀。有些厚板有两种显微组织,表层为再结晶组织,而中间层为晶粒沿轧制方向伸长的非再结晶组织,在实验室进行盐水喷洒试验时,中间层试样经 14 d 试验后发生剥离腐蚀(图 18 左),而厚板表层发生晶间腐蚀(图 18 右)。

1972 ~ 1990 年北美用 5086-H32 铝合金或 5086、5083、5456-H116 铝合金制造了一批批舰船,再也没有发生这两种腐蚀。2000 ~ 2002 年,美国太平洋西北地区的造船企业用了大量成本比 5083-H116 铝合金板材低的 5083-H321 铝合金薄板与厚板制造海上双体船与巡逻船。事先材料生产者就提出 5083-H321 铝合金板材不适合制造海域舰船,但造船

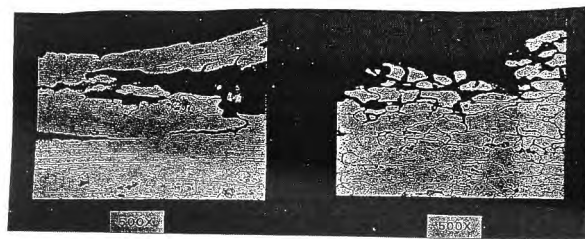


图 18 1968 年美国一公司用 5456-H321 铝合金制造越南河道巡逻艇材料在试验时所发生的腐蚀<sup>[10]</sup>

Fig. 18 The corrosion occurred when an American firm was conducting a test on building a ship patrolling on Vietnam's riverway with 5456-H321 aluminum alloy in 1968<sup>[10]</sup>

厂不顾这种提示,仍然制造了一批,几个月后对 400 艘舰船作了检查,发现有一些出现了应力腐蚀开裂,其原因仍是显微组织不合格,对应力腐蚀敏感。自此以后,美国铝业协会、欧洲和澳大利亚的有关标准都规定,凡是用于制造船舶舰艇的 5083、5456、5386 等铝合金必须消除对晶间腐蚀、剥离腐蚀和应力腐蚀开裂敏感的显微组织,5083、5086、5383、5456 及 5059-H116、5059-H321 铝合金材料还必须通过 ASTM B928 试验。

21 世纪以来,美国太平洋西北地区和中西部地区用符合 ASTM B928 标准的  $5 \times \times \times$  系铝合金制造了近 300 艘铝合金舰艇都完好无损,它们的长度为 15.3 m ~ 53.4 m。

### 3.1 Al-Mg 合金在海水中的腐蚀

Al-Mg 合金在海水中的腐蚀速度十分缓慢,它的抗腐蚀性能与含 Mg 量有关;  $w(Mg) < 5\%$  的铝合金具有足够好的抗海水腐蚀性能;  $w(Mg) > 5\%$  的铝合金,处理不当均有晶间腐蚀和应力腐蚀破裂倾向。

苏联 Б. Н. Бабичава 曾经作过试验,对 AMr5B 等五种材料进行抗腐性能比较,其结果列于表 16、17、18。

表 16 铝合金和钢 CXJ14 交变沉浸在 3% NaCl + 0.1%  $H_2O_2$  中试验两个月后力学性能的变化

Tab. 16 The change of mechanical properties of aluminum alloy and steel CXJ14 after they were immersed alternatively in the liquid of 3% NaCl + 0.1%  $H_2O_2$  for two months

| 材料         | 质量损失<br>g/mm <sup>2</sup> | 腐蚀前                       |                                |            | 腐蚀后性能损失 / %               |                                |       | 表面状态         |
|------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------------|------------|---------------------------|--------------------------------|-------|--------------|
|            |                           | $R_m / (N \cdot mm^{-2})$ | $R_{p0.2} / (N \cdot mm^{-2})$ | $A_5 / \%$ | $R_m / (N \cdot mm^{-2})$ | $R_{p0.2} / (N \cdot mm^{-2})$ | $A_5$ |              |
| AMr5B 退火   | 0.0050                    | 273                       | 144                            | 12.9       | 28                        | 无                              | 54    | 点蚀           |
| AMr6T 包铝退火 | 0.0027                    | 310                       | 162                            | 19.6       | 无                         | 无                              | 27.4  | 小的包铝脱落       |
| Д16 不包铝    | 0.087                     | 354                       | 284                            | 3.4        | 20.8                      | 5.0                            | 79    | 表面被小溃疡连续覆盖   |
| Д16 包铝     | 0.0046                    | 462                       | 312                            | 17.9       | 无                         | 无                              | 14    | 边缘包铝破坏       |
| CXJ14      | 3.320                     | 486                       | 347                            | 14.0       | 23.8                      | 30.0                           | 46    | 沿整个表面均匀腐蚀和点蚀 |

表 17 铝合金及钢 CXJL-4 全浸在 3% NaCl(无  $H_2O_2$ ) 溶液里试验 9 个月后力学性能的变化

Tab. 17 The change of mechanical properties of aluminum alloy and steel CXJL4 after they were immersed completely in the liquid of 3% NaCl( no  $H_2O_2$ ) for nine months

| 牌号和状态    | 质量损失<br>$g/(h \cdot m^2)$ | 腐蚀前                     |                              |        | 腐蚀后性能损失 /%              |                              |      | 表面状态               |
|----------|---------------------------|-------------------------|------------------------------|--------|-------------------------|------------------------------|------|--------------------|
|          |                           | $R_m/(N \cdot mm^{-2})$ | $R_{p0.2}/(N \cdot mm^{-2})$ | $A/\%$ | $R_m/(N \cdot mm^{-2})$ | $R_{p0.2}/(N \cdot mm^{-2})$ | $A$  |                    |
| AMr5B 退火 | 0.0058                    | 286                     | 145                          | 22.3   | 无                       | 无                            | 20.7 | 个别溃疡深 0.5 ~ 0.6 mm |
| AMr7     | 0.0051                    | 246                     | 149                          | 7.0    | 25.8                    | 无                            | 77.0 | 溃疡深 0.2 ~ 0.7 mm   |
| Д16 不包铝  | 0.0011                    | 362                     | 276                          | 5.5    | 17.0                    | 86                           | 74.3 | 边缘破坏               |
| Д16 包铝   | 0.0054                    | 462                     | 268                          | 18.1   | 无                       | 11.3                         | 15.8 | 许多溃疡 0.1 mm        |
| CXJL-4   | 0.024                     | 458                     | 241                          | 24.0   | 20                      | 69                           | 7.3  | 均匀腐蚀               |

表 18 铝合金和钢 CXJL-4 沉浸在 3% NaCl + 0.1%  $H_2O_2$  溶液里试验 3 个月后力学性能的变化

Tab. 18 The change of mechanical properties of aluminum alloy and steel after they were immersed completely in the liquid of 3% NaCl + 0.1%  $H_2O_2$  for three months

| 牌号和状态       | 腐蚀前                     |                              |          | 腐蚀后性能损失 /%              |                              |       | 表面状态     |
|-------------|-------------------------|------------------------------|----------|-------------------------|------------------------------|-------|----------|
|             | $R_m/(N \cdot mm^{-2})$ | $R_{p0.2}/(N \cdot mm^{-2})$ | $A_5/\%$ | $R_m/(N \cdot mm^{-2})$ | $R_{p0.2}/(N \cdot mm^{-2})$ | $A_5$ |          |
| AMr5B       | 279                     | 146                          | 21.5     | 无                       | 无                            | 23.1  | 表面有黑色薄层  |
| AMr6T 包铝、退火 | 297                     | 160                          | 20.4     | 无                       | 无                            | 24.4  | 一些试样包铝脱落 |
| Д16 不包铝     | 322                     | 225                          | 12.9     | 28.0                    | 38.6                         | 86.0  | 带有深的溃疡   |
| Д16 包铝      | 466                     | 228                          | 19.9     | 无                       | 24.5                         | 7.9   | 包铝层破坏    |
| CXJL-4 热轧   | 532                     | 235                          | 21.9     | 74                      | 52.2                         | 15.8  | 均匀破坏     |

从以上三个表的数据可以看出, Al-Mg 合金 AMr5B、AMr6T 抗腐蚀性能比硬铝和钢的好得多, 在腐蚀介质中沉浸二个月、三个月和九个月后, 质量损失很少, 力学性能( $R_m$ 、 $R_{p0.2}$ ) 降低极少, 这说明它们的抗蚀性有明显的优越性。

C. W. 莱维奥在“铝及其在军舰中的应用”一文中<sup>[3]</sup> 列举了 5083 和 5086 等铝合金在海洋环境中的抗蚀性。沉浸在海水中的材料均没有进行保护, 6 年以后, 5086-H34 铝合金腐蚀坑的最大深度为 0.86 mm, 但没有大的强度损失。另一个试验是将未焊接的与焊接的 5086 和 5083 铝合金板材部分浸入或者全部浸入“佛罗里达州对托那海滨”的海水中 5 年和 7 年。5 年以后, 全浸的未保护焊缝和未焊接的 5086 和 5083 铝合金的强度损失都可以忽略不计, 蚀坑也很少能见到, 并且最大的腐蚀坑深 0.38 mm。在部分浸渍的试验中, 3.175 mm 厚未焊接的 5086 和 5083 铝合金薄板, 不管沉浸条件如何, 其强度损失都可以忽略不计。这些证明 5086 和 5083 铝合金保持着固有的抗海水应力腐蚀的能力。

### 3.2 铝合金船体的腐蚀

铝合金船体的腐蚀与原材料固有的耐蚀性、结构的合理性、防护措施、航行海域以及平时的保养优

劣有关。从施工实践可知, Al-Mg 合金船体抗蚀性好, 硬铝合金船体的抗蚀性差。根据中国具体情况, Al-Mg 合金系正在发展, 新材料正在研制和逐步推广, 硬铝合金起着承上启下的作用。过去应用硬铝合金制造的舰船目前有一些还在使用, 因此介绍和分析硬铝合金结构的腐蚀和防护措施具有现实意义。此外, 硬铝合金如能通过有效的防护措施, 延长使用年限, 那么对 Al-Mg 合金船体的防护就更有办法了。

硬铝合金船体腐蚀的形式有均匀腐蚀、局部腐蚀和晶界腐蚀, 其中晶界腐蚀危害最大。从腐蚀部位来看: 艏部推进器区域腐蚀比其他部位的严重; 异种金属接触比单纯铝结构腐蚀严重; 缝隙、转角、死角比平直部位容易腐蚀; 不易保养的隐蔽部位比敞露部位容易腐蚀。硬铝合金船体腐蚀部位和因素大致如下:

#### 1) 铝合金船体艏部腐蚀比较严重

铝合金船体艏部, 由于铜推进器、钢轴支架等异种金属处于海水这个电介质中。铜是阴极, 铝是阳极, 两者电位差比较大, 因此该处腐蚀电流也特别大, 腐蚀比较严重。该处船底板呈坑点腐蚀和局部溃疡腐蚀, 腐蚀深度 3 mm ~ 5 mm。艏部舵轴孔四周

的船底板腐蚀也十分严重,造成腐蚀的原因是该处有多种不同金属。舵轴和舵叶是钢制的,舵轴承是铜制的,与底板连接的螺钉又是不锈钢。在这些金属中,铝合金的电极电位最低,是阳极,起到牺牲品的作用。也有因为艏部防蚀锌板不够或者由于锌板安装不妥和化学成分不合格而起不到应有的防护作用,都会加速铝板的腐蚀。

在船体水线下的其他部位也有电化学腐蚀,不过没有艏部强烈。因为在腐蚀电流不大的情况下,合金表面的纯铝层起到保护合金免遭腐蚀的作用。施工中经常可以看到这种情况,例如有的铝板上阳极氧化膜虽然已局部脱落 20% ~ 30%,但裸露的合金并没有腐蚀,也没有向纵深发展。其原因是:一方面油漆在起作用;另一方面是纯铝层作为阳极而保护着合金。

## 2) 缝隙腐蚀

船体水线以下结构或装置的缝隙,是造成腐蚀的突破口。因为氧气难于或者根本无法进入这些缝隙中,因此会在缝隙中迅速地发生相异充气的原电偶。在原电偶中位于凹陷中的铝合金是阳极,往往遭受严重腐蚀<sup>[2]</sup>。缝隙腐蚀的特点是在纵深处形成,破坏性特别大。例如铆接船体外板接缝边缘不密贴,海水从边缘侵入内部,会在夹层里产生水袋,形成原电偶而造成严重腐蚀。腐蚀物(氢氧化铝)体积膨胀会使铆钉接缝松弛。图 19 所示是海水浸入铝板接缝,造成缝隙内部腐蚀而使铆钉脱落,结构损坏。有一艘铝质艇,海水溅入舱内,流入外板与骨架的缝隙里,产生严重腐蚀,氢氧化铝腐蚀物的膨胀力使外板鼓出来形似蚌壳。水翼艇辅助水翼的钢支架复板贴合在铝外板上,贴合面不密贴有间隙,也会发生相异充气的原电偶。又因为是钢、铝接触,因此贴合处的铝板特别容易腐蚀。

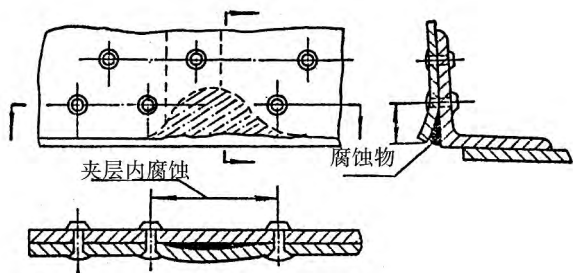


图 19 接缝内部的腐蚀

Fig. 19 Inner corrosion of the seam

高速铝艇艏轴架支承处做成凹坑,轴架的顶板嵌在里面,四周难免有一些间隙,这些缝隙里面形成

水袋和原电偶,也是导致腐蚀的突破口。

## 3) 异种金属接触腐蚀

铝合金与铜、青铜、黄铜直接连接时,它的电化学腐蚀要比铝合金与钢、Pb 或 Ni 连接时更强烈,而且浸泡在海水里的双金属(异种金属)接头中的铝合金电化学腐蚀比其他介质中的要强烈得多。例如在铝船体上安装铜质海底阀门罩壳处,腐蚀也特别严重,有的是水密填料中含有 Pb、Hg 等腐蚀物或者接合面不密贴,也是造成腐蚀原因之一。有些异种金属接头(例如甲板舭装件的钢支架,其下面的铝板)不浸在海水里也往往腐蚀得十分严重。其原因是钢支架没有镀锌及必要的防护处理,同样的钢支架如果镀锌以及在贴合面间放一层密封橡胶带,那么对铝合金的腐蚀就缓慢得多。

安装在舷部的排烟管出口的钢质法兰与铝板接触处,由于异种金属半浸在水里,加上排烟管的温度比较高,所以该处铝板的腐蚀也比较严重,开孔的边缘经常因为腐蚀而导致裂边和穿孔。

## 4) 铝合金与木料接触造成的腐蚀

这种例子在修船时也经常见到,与护舷木接触的铝合金角材,由于树液直接侵袭所产生的腐蚀十分严重,有的角材烂断,外板穿孔,角材的腐蚀物像甘蔗渣一样呈疏松状(图 20)。

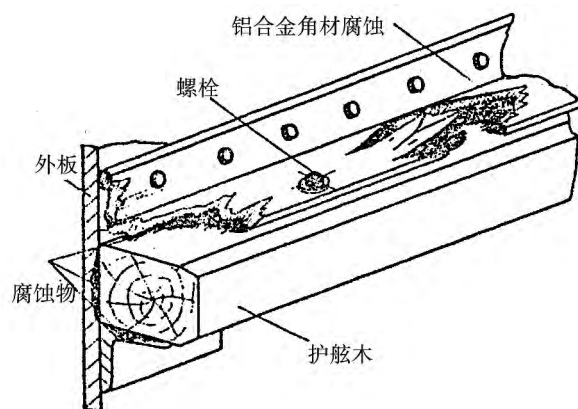


图 20 铝与木料接触的腐蚀

Fig. 20 Corrosion on the contact of aluminum and wood

## 5) 不合理结构造成的腐蚀

船体结构要避免积水的“死角”。例如有一种铝质水翼艇,安装于舷侧的水翼支承箱呈“皿”字形,外面用防护罩盖住以后,两端就成为“死角”,平时又不易保养,“死角”部位舷侧外板普遍严重腐蚀。如果改进结构,避免积水“死角”,就可以保护该处铝板免遭腐蚀。

铆钉孔排列不当也会引起腐蚀。例如铆钉孔间

距太大,就会产生翘边而使海水侵入夹层内,从里面开始腐蚀。图21是舱壁水密填料函(俗称铁斗)底部由于铆钉间距太大,舱底积水浸入缝隙内而使船底板腐蚀。

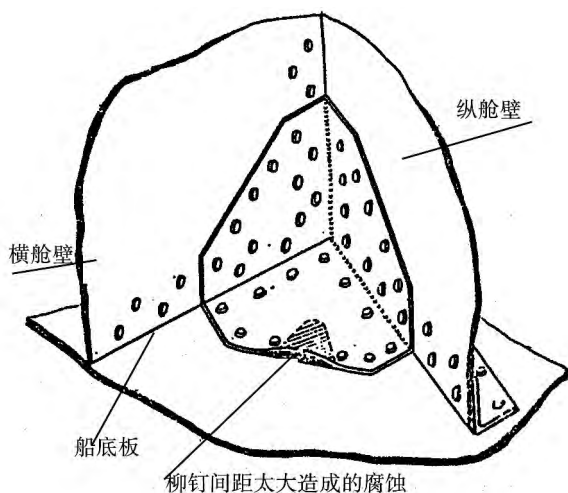


图21 铆钉孔排列不妥造成腐蚀

Fig. 21 Corrosion caused by improper arrangement of rivet holes

#### 6) 杂散电流腐蚀

舰船停靠在码头上,若借用钢缆和钢码头来导电,就有部分杂散电流经水传导到钢码头,船体成为阳极而遭受严重腐蚀。防止的办法是,电焊机与被焊件间应直接用导线连接。

艇体中修更换的外板中,属于结构不合理造成腐蚀而更换的占25%;异种金属接触造成腐蚀而更换的占15%;属铝与木料接触而造成腐蚀更换者占15%;属于电化学腐蚀而更换者占45%。这就是说,参考文献:

- [1] 顾纪清. 铝合金船体及上层建筑施工[M]. 北京: 国防工业出版社, 1983: 2-10.
- [2] 张迎元. 铝合金在舰船中的应用[A]. 北京: 安泰科信息开发有限公司 2005年中国交通用铝国际研讨会[C]. 2005: 167-175.
- [3] 轻金属协会编. 新版アルミニウム技术便览[M]. カロス出版, 1996: 1085-1096.
- [4] 重松正博, 近藤喬. アルミ工-[J]. Japan Aluminium Association 2008, 167: 1-3.
- [5] 谭乃芬. 2013年中国船舶工业运行情况及铝在船舶中的应用[A]. 北京: 安泰科信息开发有限公司, 2013年中国交通用铝论坛[C]. 2013: 76-91.
- [6] 王 珏. 船舶用铝合金材料[J]. 轻金属, 1994(6): 58-64.
- [7] 金子孝雄, 竹内腾治. 轻合金溶接[M]. 东京: 出版社不详, 1992: 166.
- [8] 魏梅红, 刘徽平. 船舶用耐蚀铝合金的研究进展[J]. 轻合金加工技术, 2006, 34(12): 6-8.
- [9] 赵 勇, 李敬勇, 严 铿. 铝合金在舰船制造中的应用与发展[J]. 中外船舶科技, 2005, 1: 9-11.
- [10] THOMAS J Summerson. Corrosion of Aluminum Marine Alloys in Boats[J]. Light Metal Age, Dec. 2008: 12-17.

只要加强对薄弱环节的防护措施,腐蚀可以明显减少,中修时的换板也至少可以减少一半,这说明减少硬铝合金结构的腐蚀,延长使用年限是完全做得到的。

#### 3.3 上层建筑的腐蚀

硬铝合金制成的上层建筑、甲板室、轻型围壁,虽然不像船体那样浸在海水中会造成电化学腐蚀,但是上层建筑受飞溅海水的冲击或处于潮湿的天气中。这种天气带有盐分,硬铝合金在潮湿中也会产生胶状氢氧化铝,使铆缝破损。

现在,舰船的上层建筑都是用经过阳极氧化处理的抗蚀性强的5×××、6×××、3×××系铝合金材料建造的,具有相当强的抗腐蚀性能。

#### 3.4 铝合金船防腐蚀措施

从舰船铝合金结构的设计开始到施工的每一道工序,都应注意对铝合金的防护。结构设计时要避免造成海水停滞的“死角”和经常处于潮湿的沟槽及缝隙。铝合金结构要有利于平时清洗和保养。对于铆接结构:排列铆钉孔时要注意间距和边距。划线、号料、加工、装配、铆接要防止划伤铝板表面的包铝层。热处理要严格控制加热、保温、冷却、时效等工艺参数,这是防止晶界腐蚀和应力腐蚀的有效途径。从施工和使用实践看,铝合金进行阳极氧化处理是行之有效的防腐措施之一。处理好的工件,在装配、铆接中要防止损坏阳极氧化膜。在施工中加强对异种金属结构的防护措施以及铝与木料接触的防护。实践证明,采用油漆涂层、氯丁橡胶以及阴极保护等办法也可以收到预期的防护效果。

(续完)