

特约专栏

钛材在海军工程中的应用及需要解决的问题

蒋成禹¹, 赵勇^{1,2}

(1. 江苏科技大学 先进焊接技术省级重点实验室, 江苏 镇江 212003)

(2. 上海交通大学 材料科学与工程学院焊接工程研究所, 上海 200240)

摘要: 概括地介绍了国内外海军工程应用钛材的情况, 分析了目前存在的问题及解决这些问题的对策。我国钛材产量已达万吨水平, 合金种类, 材料品种规格等已经达到了在海军工程中大量应用的条件。

关键词: 钛材; 海军; 工程应用

中图分类号: TG146.2⁺3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2010)05-0025-05

Titanium in Navy Engineering Applications and Problems to Be Solved

JIANG Chengyu¹, ZHAO Yong^{1,2}

(1. Provincial Key Laboratory of Advanced Welding Technology, Jiangsu Science and Technology University, Zhenjiang 212003, China)

(2. Institute of Materials Science and Engineering, Laboratory of Welding Engineering Research, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: An overview of domestic and foreign naval engineering research and application of titanium was introduced, and the existing problems and countermeasures to address these issues were also analyzed. The level of ten thousands t of titanium products in China has reached, alloy types and materials specifications already have large-scale application conditions in naval engineering applications.

Key words: titanium materials; navy; engineering application

1 前言

自上世纪60年代我国就开始研究钛材在海军工程中的应用, 经过40多年的研究取得了很大的成绩和进展, 先后由国家、海军组织召开了多次大型钛材在海军工程应用的研讨会、推广会, 并且在水面、水下武器装备中得到了一定的应用。但是应用还十分有限, 仍然存在着选材不尽合理, 设计准则不够规范, 大规模应用钛材的品种规格不够配套齐全, 钛材产品制造费用偏高, 大型船厂应用钛材设备现场加工配套能力弱等问题。有些工况条件下对钛材应用的认识水平还比较粗浅, 例如腐蚀问题, 海生物附着问题, 全寿命周期的性价比等问题。除材料标准外, 还有在系统的加工制造方面的标准比较缺乏, 设备加工制造供货周期偏长, 钛设备加工制造厂家少, 竞争招标的态势远未形成等一系列问题。

国外, 钛材在海洋工程的应用已经十分广泛, 应用

技术成熟。以俄罗斯为代表, 其在国民经济中对钛材应用中的设计、生产和制造一直给予了特殊的重视, 对舰船装置用钛合金热交换器、容器、管路系统, 声纳系统、深潜器也给予了重点支持, 使钛合金在海军工程中得到了有效的应用。俄罗斯在舰船用钛合金的设计理论、合金选取原则, 以及在重大工程中的一系列理论、工艺、材料和设计等方面做了大量卓有成效的研究、试验工作, 积累了可供实际工程应用的成套技术文件。同时, 针对水面舰船、水下潜艇、深潜器、水中兵器等也做了大量单项、设计型、综合型的试验以及实船试验, 从系统工程出发, 总结了应用时应该解决的问题和如何解决这些问题, 真正做到了一舰数据多舰用, 一个结构可以被另一个结构所应用。

我国目前和国外相比, 钛材生产水平相当, 但应用水平还处于分散、零星的状态, 还有相当的差距, 所存在的问题只能在应用中研究, 在应用中去解决。

2 钛材在国内外海军工程的应用现状

钛以其轻质、高比强、高比刚、高耐蚀、无磁性等

优异性能被称为“海洋金属”，是海军工程最有应用前途的金属材料，被世界各国广泛应用于水面舰船、水下潜艇、深潜器、水中兵器、通讯设备等领域。

美国、日本、俄罗斯在深潜器上成功地使用了钛材，使下潜深度分别达到了5 000, 6 000 和 6 500 m。俄罗斯是在核潜艇中使用钛材最多的国家，其中最典型的是全钛核潜艇，其单艇用钛材达到9 000 t；其它核潜艇中的冷凝器、热交换器、声纳导流罩、通海管路系统、波纹管等都采用钛材。常规潜艇(636, K877 等)中的柴油机燃气排出系统、声纳导流罩、通海管路系统、波纹管、泵、阀也都大量应用钛材。水面舰船(如现代级导弹驱逐舰、航母)的声纳导流系统、通海管路系统、波纹管、泵、阀也都广泛使用钛材，其主要舰船都经过了北极、南极、赤道、太平洋、印度洋、大西洋的全球海域航行，解决了设计许用应力、安全系数选取等问题。美国、日本多种舰船喷水推进装置上也使用钛材，有效地克服了采用铜合金在航行时切割地球磁力线而产生较大感应电流的不利影响。英国的北海油田用钛合金代替合金钢(Cr-Mo 钢)做高压管路，减少了质量和维护费用，使采油成本下降了40%。他们采用单根尺寸为 $\phi 609\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 1\,460\text{ mm}$ 的30根管组成了400多米长，总重900 t的特大油管，用于水深350 m的海底采油系统，该工程可反映出英国在海军用钛上的思路。图1是俄罗斯最新型拉达级常规潜艇，据俄罗斯专家介绍，该型潜艇大量采用钛合金结构，包括声纳系统、通海管路系统、波纹管、泵、阀等。图2为俄罗斯636型常规潜艇，管路系统也采用钛材。



图1 俄罗斯最新型拉达级常规潜艇

Fig. 1 Russia's newest Lada-class conventional submarine

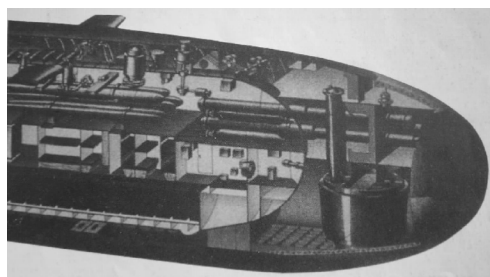


图2 俄罗斯636型常规潜艇内部结构

Fig. 2 Internal structure of Russia 636-type submarines

图3是俄罗斯K877型常规潜艇，与636型潜艇相似，其最典型的特点就是声纳导流罩结构全部采用钛材。经分析声纳罩全部结构，所有部位(透声板、支架、法兰)均使用ИТ3В一种合金制造，并采用单壁结构，由数控铣床加工出均布的透声孔，设计出良好的透声性、足够大刚度、抗变形能力的结构。从俄罗斯获得的ИТ3В合金的化学成分见表1，板材的力学性能见表2。

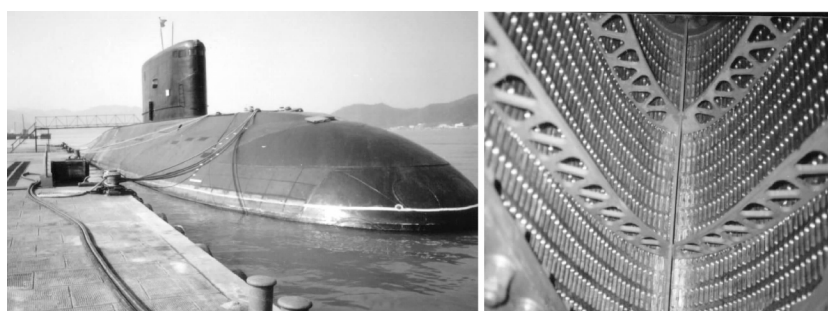


图3 俄罗斯K877常规潜艇球鼻艏钛合金声纳导流罩

Fig. 3 Titanium alloy nose bow sonar dome of Russia K877 conventional submarine

表1 俄罗斯ИТ3В钛合金的化学成分(标准号ГОСТ19807-1974)

Table 1 Chemical composition of Russia ИТ3В titanium alloy (standard number ГОСТ 19807 - 1974)

Trademark	Chemical composition, w/%										
	Ti	Al	V	Fe	Si	Zr	C	N	H	O	Sum of other elements
ИТ3В	Matrix	3.5~5.0	1.2~2.5	≤0.25	≤0.12	≤0.30	≤0.10	≤0.04	≤0.008	≤0.15	≤0.30

表2 俄罗斯 ИТ3В 钛合金板材的力学性能
Table 2 Mechanical properties of Russia ИТ3В titanium alloy sheet

Trademark	Specimen status	Thickness/mm	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A /%	Z /%	α_K /MJ·m ⁻²	Standard number
ИТ3В	Annealing	11 ~ 14 14 ~ 26	≤880 ≤835	≥590	≥10	≥25 ≥22	≥0.6	ГОСТ 23755 – 1979

图4 为前苏联“台风”级全钛制造的核潜艇，全艇用钛量高达9 000 t，图5 为俄罗斯全钛核潜艇用钛材布局图。



图4 前苏联台风级全钛核潜艇
Fig. 4 Former Soviet Typhoon-class nuclear submarine with all-titanium

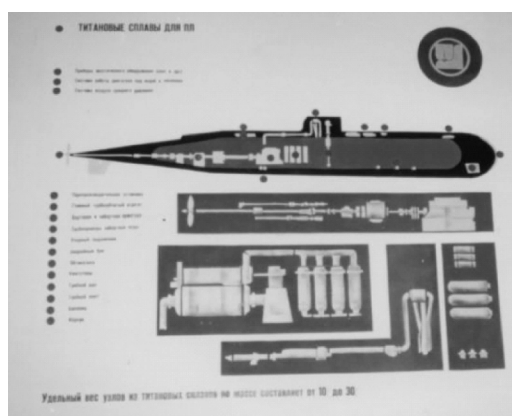


图5 俄罗斯核潜艇用钛材布局图
Fig. 5 Russian nuclear submarine with titanium layout

图6 是“俄罗斯956 现代级”导弹驱逐舰钛合金球鼻艏实物图，从图中可知俄水面舰船声纳导流罩采用双层



图6 俄罗斯“956 型现代级”导弹驱逐舰钛合金球鼻艏
Fig. 6 Titanium bulbous bow of Russia “956-type modern class” guided missile destroyer

板架结构，化验分析表明，该结构采用一种合金（ИТ3В 钛合金）制造，钛法兰和船体钢法兰采用聚合物绝缘套筒进行电绝缘，较好地解决了钛-钢接触的电化学腐蚀问题。

图7 是俄罗斯“明斯克”号航母钛合金声纳导流罩，该结构也采用 ИТ3В 一种合金制造，成型美观，装配精确，也采用双层板架结构。

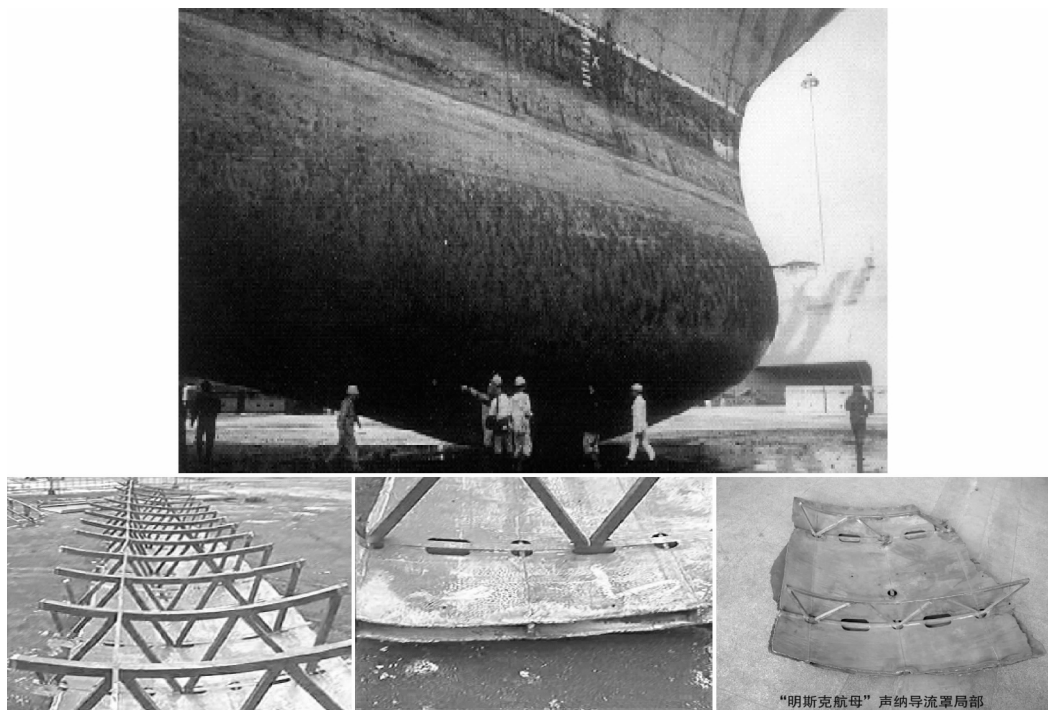


图 7 俄罗斯“明斯克号”航母钛合金声纳导流罩球鼻艏

Fig. 7 Titanium alloy bulbous bow sonar dome of Russia "Minsk" aircraft carrier

我国自上世纪 60 年代起开始研究舰船用钛合金,在国内相关单位的共同努力下,研究了从工业纯钛到不同强度等级系列的船用钛合金及其配套焊接材料,例如工业纯钛, Ti31, Ti75, Ti80, TA5, TA7, TC4, TC4ELI 等合金。在海军及有关部门的支持下,钛合金在我国相关产品中也得到了广泛的应用。

3 海军工程用钛的选材原则

(1) 可胜任要求的特定性能(强度、耐蚀、声学、磁学等)。

(2) 系统要求的综合性能(强度与韧性、冷热成型、焊接等性能)。

(3) 成本及经济效益方面需要考虑密度、强度、材料价格、制造费用、维修及更换费用、系统下的全寿命周期费用。

(4) 全寿命周期思想在选材上的应用。通过分析俄罗斯舰船用钛的情况,俄罗斯在某一特定舰船上应用时合金系的选择尽量简单化。例如,俄罗斯所有的声纳系统只采用 ИТ3В 一种合金;核潜艇的二回路和深潜器也只选择此合金。强度要求高的深潜器的载人球体用的是 Ti-6Al-4V 等合金。所选用的合金都有相关成熟的技术条件和生产工艺。

(5) 应该指出的钛材在海洋工矿条件下应具有的特点,设计选材时应该注意的问题: a. 钛材在室温至零

下 60 °C 范围内无脆性转变,其冲击韧性对温度不敏感。

b. 钛合金在交变弯曲载荷下,其疲劳强度比铜合金明显高,如表 3 所示。

表 3 TA5 和 B30 合金在不同应力循环条件下交变疲劳强度对比

Table 3 Alternating fatigue strength of TA5 and B30 alloys under different cyclic stress conditions

	Cyclic number	Alternating fatigue strength	
TA5 alloy	10^8	235 MPa	Under the conditions of natural seawater shower
	10^7	255 MPa	
B30 alloy	10^8	147 MPa	in air

4 钛材的耐海水腐蚀性

(1) 天然静海水腐蚀: TA3(老牌号 TA2), TA5 及 B30 在青岛、厦门、榆林做过 5 年腐蚀试验, TA3, TA5 不腐蚀,而 B30 发生严重点蚀,深度最大处达 1 mm 左右;试验表明,钛无应力腐蚀倾向,且在天然海水中不发生缝隙腐蚀。

(2) 接触腐蚀: 当钛与铜合金、钢等接触时,钛的电极电位为正,会在此时加快其他金属的腐蚀速度,在系统中连接时,应采取电绝缘措施。

(3) 冲刷腐蚀: B30, 镍合金在流速大于 5 m/s 时,耐冲刷腐蚀性能很差,而钛合金在 7 m/s, 10 m/s 以上

仍然保持完好无损。

(4) 氯化物离子难于侵蚀钛合金表面的钝化膜, 因而不易发生像不锈钢和铝那样的点蚀、间隙腐蚀以及应力腐蚀。

(5) 与不锈钢不同, 钛合金的焊接、冷加工不会导致耐蚀性能变化。

5 关于海生物附着问题

上世纪80年代末至90年代初, 针对海生物附着问题进行了相应研究, 在有关海区做了钛试验装置并进行了观察和分析, 提出了相应分析研究报告, 在对南海、东海、北海三个海区的水下相关潜艇通海系统管道实际考察中, 发现海生物生长极少, 主循环水系统也没生长海生物。

6 设计准则

(1) 材料标准: 尽量采用国标, 以便于生产、供货使用, 检验。

(2) 设计标准: 国外针对海军舰船使用有专用的设计标准, 而我国目前尚没有, 建议通过研究尽早建立我国海洋工程用的设计原则, 改变按化工设备设计的一般原则。

(3) 加工标准: 热处理、机械加工、切割加工、冷热成型、焊接、表面改性处理等。针对大量采用钛材的预期需求, 应编制这方面的技术文件, 以指导钛设备的加工制造。

(4) 检验标准: 外观、无损检测、常规力学性能、硬度、疲劳等; 大多数检验沿用钢结构的标准, 应逐步

形成我国自己的专用标准。

(5) 钛材应用时与系统其它材料接口技术及其标准, 如电绝缘标准。

7 结 语

钛及钛合金无疑是在海水条件下应用的非常好的材料, 俄罗斯在海军装备中大量采用钛合金是一个不用争辩的事实, 他们大量地采用钛合金是经过长期卓有成效的研究后, 形成了从材料合金研究、钛材各种规格的生产、结构设计、加工制造、使用环境与材料的关系、检验规则等一整套工艺文件, 并以理论基础作为保证的。

我国钛工业发展已能满足海军大规模用钛的需求, 为了可靠地应用到武器装备上, 国家有关领导机关应认真研究对策, 根据俄罗斯的经验认真研究我们总的方针, 加大钛材生产的力度, 并以龙头企业为主体, 充分发挥产、学、研、军四位一体的机制, 认真解决一系列相关技术问题, 例如合理的选材、正确的设计准则的制定、钛材应用与其它材料接口技术、加工制造的规范标准的制定等, 特别应建立能统筹设计、材料、加工制造、使用维护等系统工程的组织和机构。

同时, 要重视钛材应用相关问题的研究和开发, 如钛制品的模铸、焊接技术、特殊条件下的表面改性、设计准则等问题, 这绝不是一个系统、一个部门、一个单位所能包办的, 必须要打破行业界限, 打破地方主义, 开展全国性大协作才能尽快尽早解决问题。为了祖国强大海军的建设, 应以科学发展引领各单位的协调合作, 提高水平, 降低造价, 尽快把钛材在海军工程中应用推广到位。

中科院苏州纳米技术与纳米仿生研究所 碳纳米管宏观取向材料研究取得新进展

碳纳米管是一种有着特殊结构和性质的新型材料, 具有奇特的物化性能, 特别是其优异的各向异性力、热、光、电特性。因而, 碳纳米管有序结构的获得, 将会更大地发挥碳纳米管的优异特性, 是高性能复合材料与器件研究的重要物质基础。

最近, 中科院苏州纳米技术与纳米仿生研究所陈韦课题组在利用液晶相制备高度有序碳纳米管复合材料研究方面取得新进展。该课题组博士研究生卢露华在导师陈韦研究员的指导下, 克服了超强酸质子化等苛刻条件的限制, 研究发现了一种新型分散剂下的碳纳米管高浓度分散和大面积的液晶取向。该新型分散剂是以常见的微生物胞外多糖结冷胶(gellan gum)为原料, 在很低的用量以及简单的制备工艺条件下, 即可实现高长径比碳纳米管与非棒状颗粒的有效分离与富集; 所获得碳纳米管高浓度稳定分散体系具有明显的液晶行为; 所制备的宏观复合膜材料则表现出较大面积的波纹状碳纳米管取向排列, 并显示出良好的各向异性电学特性。该生物复合体系为实现大面积碳纳米管有序功能材料及生物医学应用奠定了重要的技术和物质基础。

本研究成果发表在美国化学学会 ACS Nano(2010, 4, 1042)上。

(摘自中国科学院网站)