

船舶海水管路钛合金应用技术研究

宋德军, 牛 龙, 杨胜利

(中国船舶重工集团公司第七二五研究所, 河南 洛阳 471023)

摘 要: 钛合金以其高比强度、优良的耐海水腐蚀性能, 成为未来船舶选材的热点。综述了海水管路用钛合金的材料选用、焊接技术、弯管技术、腐蚀防护以及防海生物污损等方面的研究工作进展并进行分析, 证明钛合金是船舶海水管路系统的理想选择, 以期推动钛合金在船舶海水管路的推广和应用。

关键词: 钛合金; 焊接; 弯管; 腐蚀防护; 海生物污损

中图法分类号: TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2020)03-1100-05

自20世纪90年代以来,我国开始大规模采用B10合金管材作为船舶海水管路系统的主要材料^[1,2]。随着我国海军走向深蓝,对船舶装备的灵活机动性、安全可靠提出了更高的技战术要求。钛合金以其密度小、强度高、耐腐蚀性能优良等特点,成为船舶海水管路系统的最佳选择。

钛及其合金密度4.5 g/cm³,仅为B10合金密度的50%。钛合金在海水中几乎不腐蚀,其设计寿命通常在30年以上,可以很好满足船舶海水管路系统的全寿命设计。钛合金极限设计流速超过10 m/s,远高于B10合金的极限设计流速,可以为系统更高流速的设计提供保障。此外,它还具有无磁性、透声、抗冲击震动、可加工性(包括铸、锻、焊接)好等特点,是一种优秀的船舶材料。钛及钛合金在船舶上的应用一直备受人们的关注。各国海军及船舶工业对钛在船舶上的应用研究也十分重视,研制出了许多牌号的船用钛合金。为使钛及钛合金在海洋工程上获得广泛应用,人们还对其在海洋环境中的腐蚀特性进行了研究,并取得了一些进展。目前,钛及钛合金在船舶中的应用领域非常广泛,如船体结构件、深海调查船及潜艇耐压壳体、管道、阀及配件、动力驱动装置中的推进器和推进器轴、热交换器、冷凝器、冷却器、声纳导流罩等^[3-6]。

近年来,海水管路中钛及钛合金应用成为船舶发展的重要方向之一。本文结合国内外船舶海水管路用钛情况,对钛及钛合金在该领域的应用技术进行介绍,希望能更好地推动钛合金的应用。

1 船舶海水管路钛合金应用情况

目前,国外如美国、俄罗斯在海水管路系统已开

始规模应用钛合金,国内在部分小型船舶上也开始系统应用钛合金,这些应用均取得了较好的效果。

1.1 国外应用情况

俄罗斯是世界上最高在船舶上大规模应用钛合金的国家,并且根据船舶应用部位,确定了相应的常用钛合金牌号。20世纪60~80年代在船舶上大量使用钛合金,几乎所有的潜艇都采用了钛合金管道。20世纪70年代,前苏联研制并生产的“毒蜘蛛”级导弹艇,海水管路大量使用钛合金。目前仍有许多国家在装备该型号^[7]。

1990年,美国海军建立陆上管道试验场,对钛合金管路开展试验^[8],测试内容包括不同流速对海洋生物的影响等。随后美国的“圣安东尼奥”级两栖船坞运输舰(LPD17)在2个主海水配管系统(压载水和消防系统)采用了钛合金,2个系统均在船厂完成建造,包括1000个以上的管件,总长度超过3300 m的钛管。其中钛管最大通径为12英寸,这是美军船舶钛合金的一个标志性应用。该舰上层建筑区的构件是配管系统质量减轻50%,从而提高了船舶的稳定性。前期投入虽然比铜-镍合金管系高,但全寿期节省成本近1700万美元^[9]。

此外,美国在DDG51、CG47、LHA2等型号的海水管路系统中也采用钛及钛合金。

1.2 国内应用情况

我国从20世纪60年代开始船舶钛合金的研究工作,通过多年的研究发展,船舶钛合金材料体系已初步建立。2003年左右,某型号艇海水管路系统的消防系统、主辅机海水冷却系统、空调冷却系统及生活海水系统的管材、管件、法兰和阀门等全部采用纯钛^[10],这也是我国首次在海水管路系统采用钛。截止目前,

收稿日期: 2019-03-15

作者简介: 宋德军,男,1981年生,高级工程师,中国船舶重工集团公司第七二五研究所,河南 洛阳 471023,电话: 0379-67256994, E-mail: songdejun2000@126.com

这些材料服役效果良好,未发生泄漏以及腐蚀失效等问题,对在役管材进行抗拉强度复验,材料未出现性能衰减。

国内生产单位和研究单位也针对船舶海水管路的需求开展了纯钛、TA24、TA36等多种船舶钛合金管材的产品研究工作,并针对研制的产品开展了评价测试。为了全面掌握钛合金在船舶海水管路系统应用技术,国内船舶总体设计所、725所等单位搭建多个钛合金试验台架,对钛合金的材料兼容、密封承压、腐蚀防护、防海生物污损等应用技术进行系统考核。

虽然钛合金耐腐蚀等优点使其在海水管路中表现出了较好的服役性能,限于我国工业基础相对薄弱,相关研究工作开展较晚,相关数据的积累尚无法满足船舶应用对系统安全性、可靠性的需求。因此,国内船舶海水管路对钛合金的应用仍局限于小范围。近年来,随着我国海军建设的发展,钛合金在海水管路的应用已提上日程,其研究工作也不断加强。

2 海水管路钛合金应用技术研究

船舶建造是系统工程,船舶材料的研发也是系统工程,需要经过材料研制、应用研究、建造工艺研究等系列研究工作,为船舶应用提供足够的材料及配套技术支撑。钛合金在船舶海水管路中的应用也不例外。目前,我国在钛合金管材等管路用产品方面具备较强的技术基础,在应用技术如钛合金与其他金属连接使用的电偶腐蚀、钛合金的现场焊接、钛合金的防海生物污损技术以及钛合金的经济性等方面仍需开展系统的研究工作。

结合国内外应用情况和经验,针对海水管路中钛合金的应用技术研究进行系统阐述。

2.1 选材研究

船舶海水管路的选材首先应充分考虑材料的成熟性、通用性与系列性、先进性、经济性、匹配性。

材料成熟性是指材料的研制、应用研究应充分,相应的配套材料应完备,施工工艺应成熟。针对海水管路选材,首先应考选用的材料是否经过系统的研制和应用研究,除了管材本身外,配套的管件、法兰、接头、焊丝等产品是否配套齐全,相应的标准、技术条件是否完备,是否具备上舰经验或已完成上舰工艺研究。鉴于上述因素,海水管路用钛合金一般从船舶钛合金牌号中进行选择。

材料的通用性与系列性要求选用的钛合金针对船舶海水管路不同的系统具有通用性,同时产品的规格和种类也应满足设计中的所有要求;材料的先进性与经济性则要求材料具有优良的服役性能和合适的价

格;材料匹配性是指选用的新材料与现役常用材料搭配使用时的兼容性;

船舶海水管路选用的钛合金多为低强度牌号。首先是因为系统一般压力不太高,因此无需太高的材料强度;系统对振动噪声控制有要求,因此钛合金管材需要具有合适的壁厚,这也为采用低强度材料提供了条件;低强度的钛合金材料通常具有更好的塑韧性和冲击韧性,便于加工,特殊工况下安全性高;此外,低强度钛合金的成熟度相对较高、经济性较好。

2.2 工艺性能研究

船舶海水管路用钛合金均需经过系统的工艺性能研究。即在材料基本性能考核的基础上,还要开展焊接适应性、弯制工艺等与现场应用有关的研究工作。也可以说在钛合金管材上舰应用之前,其弯制工艺、焊接工艺规范必须具备^[11]。

国内如七二五所、西北有色金属研究院等单位,对钛管弯制工艺开展了系统的研究工作^[12,13]。对小规格、薄壁的低强度纯钛和钛合金主要采用冷弯工艺进行弯管制备,椭圆度和壁厚减薄均能满足CB/Z-210的标准规定,如图1。采用温弯工艺进行纯钛管的弯制成形,也可以很好地满足使用要求,同时可以有效降低弯管背弧的应力。

大规格的管材因其壁厚较大,采用冷弯工艺难度较大,通常采用热弯工艺。图2为 $\Phi 324\text{ mm} \times 7\text{ mm}$ 纯钛管热弯试样。目前,国内已完成最大规格 $\Phi 324\text{ mm}$ 的钛管2D热弯制工艺研究工作,壁厚减薄率为4.3%,其他尺寸公差也能够满足使用要求。

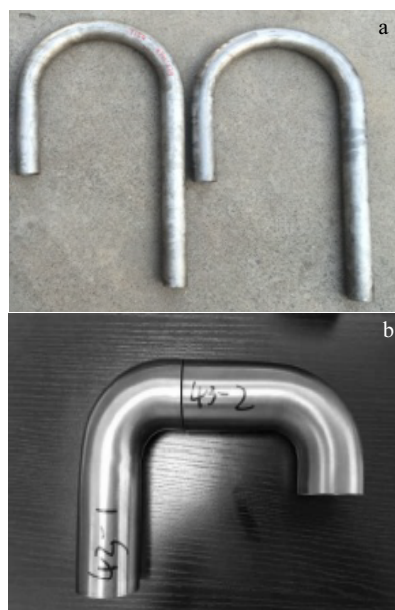


图1 纯钛管冷弯试样

Fig.1 Cold bending sample of pure titanium tube

图 2 $\Phi 324\text{ mm} \times 7\text{ mm}$ 纯钛管热弯试样Fig.2 Hot bending sample of $\Phi 324\text{ mm} \times 7\text{ mm}$ pure titanium tube

船舶材料必须具有良好的焊接性能, 钛合金也不例外。目前钛合金材料焊接工艺以 TIG 焊工艺最为常用, 可以适应较多的工况。

国内多家单位针对船用钛合金焊接开展了系统的研究^[14-16], 包括焊接材料选用、焊接工艺适应性、缺陷控制、焊接接头性能评价考核等大量工作。在焊接接头性能方面研究了不同区域的组织、性能变化特点, 焊接接头的疲劳性能、断裂韧性、抗应力腐蚀性能以及接头形式对服役性能的影响等。在这些研究的基础上制定了钛合金焊接的船舶标准(CB1216), 对焊接工艺的选用、焊接工艺评定、施工工况等给出具体的要求。如焊接施工条件规定: 一般对焊接条件的要求是温度不低于 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度不超过 80%、风速不大于 1.5 m/s 、无灰尘、烟雾以及雨、雪情况。同时, 考虑船上空间有限, 焊接接头检测方法的选用要充分考虑可操作性。

2.3 腐蚀防护技术研究

钛合金材料具有优异的耐蚀性, 在海洋环境中几乎不发生腐蚀。但是, 钛合金与关联非钛设备存在较大的电位差, 在海水环境中可能引发非钛设备发生电偶腐蚀。钛合金海水管路的应用需要解决的关键问题之一就是如何避免海水管路系统的电偶腐蚀, 其电偶腐蚀原理图如图 3 所示^[17]。

解决电偶腐蚀的手段主要是采取绝缘防护隔断电路导通。目前船舶钛合金的电绝缘防护主要采取如下 3 种方式: (1) 借助干绝缘材料实现异种金属间电绝缘, 即切断阳极与阴极直接接触; (2) 为避免海水侵蚀, 借助密封胶料对金属接头处进行密封处理, 在缝隙处填满粘稠润滑剂; (3) 对钛合金部件进行氧化处理。

目前, 上述 3 种手段在船舶海水管路系统中均得到了应用, 并根据不同的部位特点, 采用不同的组合

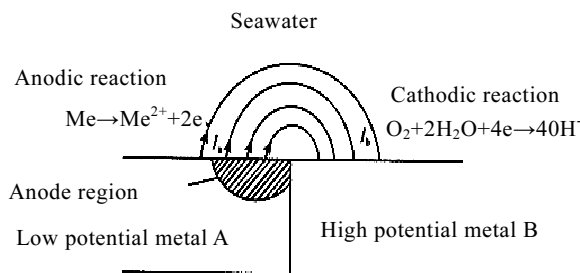


图 3 电偶腐蚀原理图

Fig.3 Schematic diagram of galvanic corrosion^[17]

方式, 确保了管路系统的安全运行。

七二五所、青岛海洋腐蚀研究所等单位针对钛合金绝缘防护开展了系统的研究工作, 拟建立电绝缘状态效果监测评价细则, 为钛合金的腐蚀防护设计应用提供可靠的指导。

2.4 防海生物污损技术研究

国内外大量研究表明: 钛材的防污性能较差。钛合金海水管路污损的危害性主要表现为: (1) 因微生物附着而积聚的有机物和泥沙会增加管路摩擦系数导致污垢热阻增加, 影响换热效率; (2) 宏观生物污损导致管道内径减小 (甚至完全堵塞), 降低流速, 增加动力消耗; 管道内污损生物脱落, 堵塞阀门, 使管道内部监检设备失灵。国内多家单位对钛合金在我国不同海域的海生物污损情况进行了对比研究, 不同海域具有明显的差别。目前, 国内也开发出了钛防污技术, 试验结果表明可以有效解决钛合金海生物污损问题。

海生物的防护方法种类繁多, 按照作用机理不同, 可分为化学方法、物理方法和生物方法。表 1 对比了 3 种防污方法的作用机制、优缺点以及常见的技术手段。从表 1 中可以看出, 化学防污方法是通过选择有效的化学物质毒杀孢子或幼虫, 是目前技术最成熟的方法^[18-20]。

化学防污方法中的电解防污技术是目前船舶海水管路内部最重要的防污手段。主要包括: 电解海水、电解铜-铝和电解氯-铜铝联用 3 种手段。目前, 七二五所已开发了多种电解防污电极装置, 其中复合防污电极在钛管路试验台架中运行试验一年多, 经过拆解滤器周边管路、焊缝处未观察到异常腐蚀现象。

据介绍, 法国 Mexel 公司生产的 Mexel 432 抑制剂产品具有较好的抑制海生物生长的作用。Mexel 抑制剂是由 C、H、O、N 4 种元素组成的长链烷基非氧化性乳状液, 加入到冷凝器管道后, 在设备表面形成

表 1 防污方法比较

Table 1 Comparison of antifouling methods^[18-20]

Protection methods	Physical antifouling	Chemical antifouling	Biological antifouling
Outline	Physical removal or reduction or prevention of biological attachment by physical means	Specific chemicals to kill organisms and interfere with attachment strength	Some mechanisms restrain adhesion, metamorphosis, interference, etc. to achieve anti-fouling
Advantages and disadvantages	Simple operation, time-consuming and laborious, unable to prevent and damage the surface	Good killing effect, partial toxicity and mature technology	Non-toxic, low toxicity, biodegradable, environmentally friendly, laboratory research stage
Technical methods	Mechanical clearance; Decontamination by water jet flow; Antifouling of peelable coatings; Low surface energy coatings; Ultrasonic ; Ultraviolet rays	Direct accession; Antifouling rubber; Chemical antifouling coatings Antifouling of electrolytic seawater ; Antifouling of electrolytic heavy metals	Biological antifouling agent; Biomimetic coatings

0.03 μm 的分子级保护膜，达到防腐功效，不会产生任何可检出的毒性中间产物，目前该产品在钛合金管路中效果尚需验证。

目前，我国船舶海水管路钛合金应用较少，相应的电解防污技术验证较少，对可能存在的未知影响，尚需开展系统的验证和设计研究工作。

3 结果与展望

1) 钛及钛合金已成为船舶海水管路系统的理想选择，未来应用广阔。

2) 船舶海水管路钛合金材料选材原则完备，国内也开展了大量应用研究工作。

3) 海水管路用钛合金在弯管工艺、腐蚀防护、防海生物污损等应用方面仍需深入开展研究工作，以解决实船应用瓶颈。

参考文献 References

[1] Xin Shibao(信世堡). *Equipment Environmental Engineering* (装备环境工程)[J], 2018, 15(1): 98

[2] Ge Liang, Wang Zhen, Cao Hongbo *et al. Ship & Ocean Engineering*[J], 2018, 47 (6): 77

[3] Chen Liping(陈丽萍), Lou Guantao(娄贯涛). *Ship Science and Technology*(舰船科学技术)[J], 2005, 27(5): 13

[4] Zhou Jiayu(周佳宇), Ha Jun(哈 军). *Development and Application of Material*(材料开发与应用)[J], 2006, 21(3): 40

[5] Li Xianjun(李献军), Wang Gao(王 镐), Ma Zhongxian(马忠贤). *World Nonferrous Metal*(世界有色金属)[J], 2013(8): 24

[6] Zhou Jiayu(周佳宇), Ha Jun(哈 军). *Development and Application of Materials*(材料开发与应用)[J], 2006, 4(3): 77

[7] Ning Xinglong(宁兴龙). *Titanium Industry Progress*(钛工业

进展)[J], 2003, 20(6): 28

[8] Qian Jiang(钱 江), Zhao Man(赵 满). *Ship Science and Technology*(舰船科学技术)[J], 2018, 40(8): 153

[9] Qian Jiang(钱 江), Wang Yi(王 怡), Li Yao(李 瑶). *Ship Science and Technology*(舰船科学技术)[J], 20016, 38(6): 1

[10] Li Lisheng(黎理胜), Xu Wenshan(徐文珊), Chen Wanhong (陈万宏) *et al. Ship and Boat*(船 舶)[J], 2016(3): 27

[11] Tian Fei(田 非), Yang Xionghui(杨雄辉). *Chinese Journal of Ship Research*(中国舰船研究)[J], 2009, 4(3): 78

[12] Song Feifei(宋飞飞), Yang He(杨 合), Yang Yingli(杨英丽) *et al. Titanium Industry Progress*(钛工业进展)[J], 2014, 31 (6): 7

[13] Tang Yuanbin(唐元斌). *Marine Technology*(造船技术)[J], 2016(2): 57

[14] Gao Fuyang(高福洋), Liao Zhiqian(廖志谦). *Aeronautical Manufacturing Technology*(航空制造技术)[J], 2012, 23(24): 86

[15] Wang Ting(汪 汀). *Ships Science and Technology*(舰船科学技术)[J], 2011, 30(6): 13

[16] Zhou Yan(周 洋), Kong Liang(孔 谅), Wang Min(王 敏) *et al. Electric Welding Machine*(电焊机)[J], 2018, 48(7): 47

[17] He Lei(何 磊). *Development and Application of Material*(材料开发与应用)[J], 2006, 21(3): 40

[18] Zhang Dun(张 盾),Wang Yi(王 毅), Wang Peng(王 鹏) *et al. Equipment Environmental Engineering*(装备环境工程)[J], 2016, 13(4): 22

[19] Zhang Wenyu(张文毓). *Total Corrosion Control*(全面腐蚀控制)[J], 2016, 30(7): 20

[20] Li Zhengxian(李争显), Wang Haonan(王浩楠), Zhao Wen(赵文). *Titanium Industry Progress*(钛工业进展)[J], 2015, 32(6): 1

Research on Application Technology of Titanium Alloy in Marine Pipeline

Song Dejun, Niu Long, Yang Shengli

(Luoyang Ship Materials Research Institute, Luoyang 471023, China)

Abstract: Titanium alloys have become the hot spot of material selection for future warships because of their high specific strength and excellent seawater corrosion resistance. In order to promote the application and popularization of titanium alloys in marine pipelines, this paper mainly summarizes the research work on material selection, welding technology, pipe bending technology, corrosion protection and marine biofouling prevention of titanium alloys.

Key words: titanium alloy; welding; bending; corrosion protection; marine biofouling

Corresponding author: Song Dejun, Senior Engineer, Luoyang Ship Materials Research Institute, Luoyang 471023, P. R. China, Tel: 0086-379-67256994, E-mail: songdejun2000@126.com