

我国舰船钛合金的研究进展

杨英丽, 苏航标, 郭荻子, 赵彬, 吴金平, 赵恒章, 罗媛媛

(西北有色金属研究院, 西安 710016)

摘要: 介绍了钛合金材料的特性及舰船对材料的特殊要求; 回顾了我国舰船钛合金的研究及发展历程、介绍了我国创新研究的舰船钛合金体系及合金的性能; 分析了我国舰船钛合金研究应用中存在的问题。结果表明: 为了加快我国舰船用钛的发展, 应尽快建立我国舰船用钛的设计准则、舰船钛合金的国家标准及钛合金材料的上艇技术指标体系, 并尽快开展舰船钛合金研究 7 个方面的研究内容。

关键词: 钛合金; 舰船; 研究进展

中图分类号: TG 146.4 **文献标志码:** A

Research progress in titanium alloys for naval ships in China

YANG Ying-li, SU Hang-biao, GUO Di-zi, ZHAO Bin, WU Jin-ping, ZHAO Heng-zhang, LUO Yuan-yuan

(Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

Abstract: The characteristic of the titanium alloy and the special demand of the naval ship materials were introduced, the research and the development history of titanium alloy for naval ships in our country were reviewed, and then newly research on the system and properties of titanium alloy for naval ships in China were presented. The question existing in the application of ships titanium alloy was analyzed. In order to accelerate the development of naval ships titanium alloy in China. It is indicated that the naval ships titanium design criterion, the national standards and the specification technical system of it should be established as soon as possible. And seven research contents of the titanium alloy for naval ships should be developed as soon as possible.

Key words: titanium alloy; naval ship; research progress

钛及钛合金具有密度小、比强度高、耐蚀性强、耐高低温、透声性好、无磁性、可冷热成形、焊接性能好等优异性能^[1], 特别是在海水和酸性烃类化合物中具有优异的耐蚀性, 是海洋技术特别是含盐环境优选的材料^[2], 因此, 被誉为“海洋金属”, 是海洋工程最有前途的金属材料^[3-14]。舰船用钛合金是我国钛产业重要的研究及发展方向之一, 是未来最为重要的应用领域。

钛材作为一种优秀的船舶材料, 各国海军及造船业对其应用十分重视, 先后研制出了一系列的船用钛合金。俄罗斯、美国和中国是最早专门从事舰船用钛

合金研究的国家, 并各自形成了自己的船用钛合金体系。俄罗斯船用钛合金研究及实际应用水平居世界前列, 拥有专门的船用钛合金系列, 形成了 490, 585, 686, 785 MPa 等强度级别的船用钛合金产品。美国对船用钛合金也进行了大量的工程研究, 成功将钛合金应用于各种动力潜艇、水面艇、民船, 主要应用的钛合金有纯钛、Ti-0.3Mo-0.8Ni, Ti-3Al-2.5V, Ti-6Al-4V, Ti-6Al-4VELI, Ti-6Al-2Nb-1Ta-0.8Mo 和 Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr 等^[9]。舰船领域用钛在我国起步较晚, 技术、装备、应用等方面还存在一些问题, 有待进一步完善。但经过科技工作者 40 多年的研

究及推广应用,已经形成了我国自主的舰船钛合金体系,并已获得了多方面的应用^[5-6]。

本文作者通过对我国舰船钛合金研发历史的回顾,简单论述了我国舰船钛合金体系情况,并介绍了我国创新研制的舰船钛合金及性能,提出为了加快我国舰艇发展,应尽快开展的舰船钛合金方面研究方向。

1 钛合金的特性及应用在舰船上的优越性

舰船,特别是以原子能为动力的舰船,是一种特别复杂的水上大型工程结构,它要配备各种武器装备、设备、仪器仪表,制造这些装置需要使用不同类型的材料,舰船的可靠性、机械寿命等与这些材料的品质密切相关^[3]。

舰船及其设备工作条件特殊:长期浸泡在海水和海洋大气环境中;许多设备和构件(如高速螺旋桨、轴、舵、阀、海水泵、热交换器、高温排气管等)易受腐蚀而不易保护;在使用中要求材料耐腐蚀性高、寿命长、安全可靠、承载大、维修少^[8]。舰船各系统装置复杂,所用材料品种杂、规格多,因此,对所使用的材料提出了特殊的技术要求^[15-16]。

金属钛作为工程材料仅有50多年的历史,但因为其具有无与伦比的特殊性能迅速在各行各业得到了应用。钛合金之所以被称为“海洋金属”,是因为其具有舰船材料所要求的耐蚀性、耐久性、牢固性、可靠性、稳定性及各种特殊性能^[5, 17]。钛合金几乎具备舰船材料所要求的全部特性,简述如下。

1) 钛合金具有舰船材料所要求的特殊物理性能^[8, 15-24]。

钛合金密度低,为 4.5 g/cm^3 ,仅为钢的57%,属轻金属;熔点较高达 $(1\ 668\pm 5)\text{ }^\circ\text{C}$,较铁、镍等常用金属还高;热导率和线膨胀系数均较低,热导率仅为铁的1/4、铜的1/7,但比不锈钢和镍基合金的高^[2, 19],热收缩率仅为钢的一半左右;无磁性;磁导率仅为 $3.2\times 10^{-5}\text{ cm}^3/\text{g}$,即使在强磁场下也不会磁化,不受雷雨天气的影响,因此钛制外壳的舰艇不易被对方磁探仪发现,可使装磁引信的水雷或鱼雷失效,可以避免磁性雷的攻击,具有很好的反监护作用,这点在军事上特别重要^[18];超导电性,在 0.49 K 低温时具有超导电性,合金化后,超导温度可提高;抗核辐射性,热中子吸收截面小,仅为 $56\times 10^{-28}\text{ m}^2$,抗核辐射性好,其辐射脆性很小,且可避免由辐射引起的有害二次辐

射问题;透声性好,透声系数高达0.85以上,某些钛合金高达0.98;抗冲击性能优异,抗冲击系数达0.63以上,是B30的4倍以上,镍基高温合金的2.5倍以上;抗弹性能良好,尽管密度低,但弹性模量也低,仅为钢的1/2,而强度、韧性高,所以抗弹性能优良;加工工艺适应性良好,可进行铸造、自由锻、模锻、轧制、挤压等各种加工,获得锻件、板材、棒材、管材、丝材、各种复杂的零部件;可方便的利用压力装置和模具使板材产生弯曲、拉伸、翻边等塑性变形异形件;可焊接性优良:焊接强度系数0.9~1.0,焊后冷弯曲角 $\geq 90^\circ$, $D=5d$,其中, D 为弯曲直径; d 为壁厚。

2) 钛合金具有舰船材料所必需的、优异的耐海水及海洋大气腐蚀性能。钛是一种非常活泼且具有强烈钝化倾向的金属,平衡电位很低,在各种介质中的热力学倾向大。但因为钛和氧的亲合力很高,在空气和含氧介质中表面能迅速形成一层致密、附着力强、惰性大的氧化膜,保护了基体不被腐蚀,即使受到机械磨损,也会很快自愈或再生,致使其具有优异的耐介质腐蚀性能^[2]。对钛及钛合金分别在北海、东海、南海3个水域进行了16年的腐蚀试验结果表明:不管是在全浸、潮差、飞溅还是海洋大气条件下,钛及钛合金的腐蚀率近于零^[25]。

3) 钛合金匹配良好的力学性能。比强度高、塑性好:在 $-253\sim 600\text{ }^\circ\text{C}$ 内,它的比强度在金属材料中几乎是最高的^[26]。冲击韧性良好:在 $-60\sim 20\text{ }^\circ\text{C}$,无明显的脆性转变点^[8]。断裂韧性较高:断裂韧性在 $80\sim 110\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 之间,从比韧性 $(K_I/R_{p0.2})^2$ 与 $(R_{p0.2}/\rho)$ 的关系曲线可以看出,钛的断裂韧性最高、钢次之、铝合金最差^[15, 21]。疲劳强度高:对于船舶大型焊接结构和壳体,产生高应力低周数破坏时的应力循环周数一般不超过 10^5 周,但钛材均在 10^7 周以上^[15]。

2 我国舰船钛合金的研制和发展历程

我国舰船钛合金的研究始于1962年^[8]。经过40多年的发展,其研究制造水平有了很大提高,现已形成了我国专用的船用钛合金体系,已能批量生产板、管、锻件、中厚板、各种环材、丝、铸件等多种形式的产品,可满足不同强度级别和不同部位的要求^[6]。纵观我国舰船钛合金的研究、发展过程,笔者认为可分为探索研究、自主研制开发、产业化及推广应用3个发展阶段。

第1阶段。1962~1987年,为初始探索研究期。这一时期我国的舰船钛合金研究主要以仿制为主,先

后仿制了俄罗斯、美国舰船用的纯钛系列、TA₅、ZTA₅、TC₄、ZTC₄、TC₁₁等钛合金系列，并探索了材料的耐海水腐蚀等基础研究。

第2阶段。1987~2005年，为自主创新研制期。1985年，根据中船重工719所提出的反应堆一回路用钛合金任务，1987年通过国家立项即开始进行自主研究，我国逐渐走上了独立研制的道路。这一时期先后创新研制了一回路用的Ti31、二回路用的Ti75、深潜器壳体用的Ti80、具有特种透声功能的Ti91及Ti70、高强度近 β 的TiB19等系列船用钛合金。进一步完善并仿制了俄罗斯的JIT-7M和BT-3B钛合金，美国的Ti-3Al-2.5V(Grade9)和Ti-6Al-4VTEL等多种船用钛合金。至此，我国创新研制的钛合金已具有了不同的强度级别，形成了较为完善的舰船钛合金体系。表1所列为一时期我国研制成功的系列船用钛合金及性能。该期间还开展了应用性能的探索试验研究：研究了系列耐海水腐蚀性能(均匀腐蚀、缝隙腐蚀、应力腐蚀、冲刷腐蚀、电偶腐蚀)、工艺适应性研究(焊接、成形、表面处理)、抗海生物腐蚀、典型管系结构的液压疲劳及装机考核等。

第3阶段。2005年至今，为产业化研究及推广应用发展期。进入21世纪以来，随着我国经济实力的迅速提升，建设强大的现代化海军、制造技术先进、安全可的新型舰艇得到了我国的重视，舰船用钛合金的研究开发进入了新的发展应用时期。这一时期不但对已形成的钛合金系列进行了品种规格的完善、开展材料的产业化研究，更重要的是开展了船舶实际应用研究。设计制备了多种钛合金系统并被舰船使用，且各造船厂也开始参与到钛合金系统的制造中。

表1 我国的船用钛合金及性能^[1, 9, 25]

Table 1 Marine titanium alloys and properties in China

合金牌号	合金成分	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A /%	Z /%	K_{1c} /(MPa·m ^{1/2})	研制单位
TA5	Ti-4Al-0.005B	684	588	15	25	-	北京有色院, 仿美
Ti31	Ti-3Al-1Mo-1Zr-0.8Ni	637	490	18	35	-	西北有色院, 研制
Ti75	Ti-3Al-2Mo-2Zr	730	630	13	25	93	西北有色院, 研制
Ti91	Ti-3Al-1V-1Zr-1Fe	700	660	20	35	-	西北有色院, 研制
Ti70	Ti-2.5Al-2Zr-1Fe	700	600	20			宝钛股份公司, 研制
Ti80	Ti-6Al-3Nb-2Zr-1Mo	880	785	10	40	-	上海钢研所, 研制
TiB19	Ti-3Al-1Mo-5V-4Cr-2Zr	1250	1200	6	18	70	西北有色院, 研制
Ti631	Ti-6Al-3Nb-1Mo	882	785	12		108	上海钢研所, 研制
TA16	Ti-2Al-2.5Zr	470	375	20			西北有色院, 仿俄
TA17	Ti-4Al-2V	560	520	16	30		西北有色院, 仿俄
TA18	Ti-3Al-2.5V	620	520	15	30		西北有色院, 仿美

3 我国创新研制的舰船钛合金及性能

我国的舰船钛合金体系见表2，其屈服强度在320~1150 MPa之间^[4]。我国创新研究的主要典型舰船钛合金及性能简单介绍如下。

1) TiB19合金^[22, 27]：这是一种近 β 高强度1200 MPa的钛合金。该合金具有高的强度、良好的塑性、且同时具有较高的断裂韧性，可焊接，耐海水腐蚀及冲刷腐蚀等综合性能。另外，该合金还具有良好的加工性能，可生产各种规格的板、棒及锻件。

2) Ti91合金^[13, 27-28]：为Ti-Al-Fe系中强700 MPa的钛合金，是由西北有色金属研究院自主研制的新型中强近 α 型透声钛合金。它具有中等强度、高的塑性、良好的透声性能、冷成形性能、可焊性及耐海水腐蚀等性能的良好匹配，1~4 mm板材的透声系数大于98%。

3) Ti-70合金^[12, 29]：是由宝鸡钛业股份有限公司与中船重工725所、701所合作研制的Ti-Al-Zr-Fe系600 MPa的近 α 中强钛合金。该合金耐海水腐蚀性好、可焊接、冷成形好，具有优异的透声性能，已制备出了1:3的导流罩模拟体。

4) Ti80合金^[30-36]：是由上海钢研所研制成功的一种新型Ti-Al-Nb-Zr-Mo系900 MPa近 α 高强度钛合金。具有高强、高韧、可焊、耐蚀及良好的低周疲劳等综合性能，与传统的高强度钛合金TC4相比，强度提高了100 MPa，塑性提高了3%~5%，冲击韧性提高了近2倍，是深潜器耐压壳体的良好选材。

4 存在的问题及建议

虽然我国舰船用钛合金体系已经形成, 船用钛合金的生产、船舶产品的建造工艺技术及批量应用时机也已基本成熟。但因舰船用材对性能提出的要求互相冲突, 我国舰船钛合金远没有形成总体设计院所、材料研究及半成品制备单位、部件成形及应用性能研究单位、舰船制造厂之间的有效协调合作机制, 造成目前的应用水平还处于分散、零星的试用状态, 只是在一些特殊的高速船、艇的建造中应用^[19, 24]。另外, 舰船设计师及制造厂家对钛合金材料的认识还不十分全面, 对其在舰船上的应用还存在一些顾虑, 舰船应用钛材设备制造现场加工配套能力非常薄弱, 还有多项关键技术没有掌握^[23]。所以, 钛合金要想在舰船上得到大量应用, 我国还有很多工作要做。这就要求相关人员在产品设计过程中帮助设计人员在选材时多从使用寿命、技术性能方面考虑, 使钛合金产品在装船实践中逐步得到推广和完善。

为了促进我国舰船工业用钛的健康、快速发展, 本文作者认为首先应解决舰船用钛的设计准则问题;

建立舰船钛合金国家标准及钛合金材料上艇技术指标体系; 突破钛加工关键技术问题。应尽快开展或完善如下方面项目的研究:

- 1) 舰船钛合金应用设计准则研究及制定;
- 2) 舰船钛系统材料整体防腐技术研究(接触腐蚀及防护技术);
- 3) 钛合金材料防海生物附着技术研究;
- 4) 高强钛合金大口径无缝通体制备技术研究;
- 5) 钛合金的方向透声技术研究;
- 6) 钛合金空间管系的弯曲成形技术研究;
- 7) 潜艇耐高温排烟管系的选材技术研究。

今后, 除了努力降低钛及钛合金原材料价格和加工费用外, 还要进行适合钛及钛合金设计基准的标准化工作和船用钛加工技术和技能的积累, 加强船用钛合金的制造和钛的加工方面人员的合作^[11, 23]。鉴于目前存在的问题, 本文作者建议: 尽快组成一支舰船钛合金研发及应用专家队伍, 该专家团队由舰船设计, 钛合金材料研究和生产、应用研究、舰船制造等相关单位的高技术素质、思想品德高尚的人员组成, 将完全从舰船钛合金实际应用出发, 以实事求是的科学态度完善并形成一套固化、切实可行的我国舰船钛合金标准及钛合金材料上艇技术指标体系, 推动我国舰船

表 2 我国的舰船钛合金体系^[1, 9, 25]

Table 2 System of marine titanium alloys for naval ship in China

类别	合金牌号	$R_{p0.2}/MPa$	性能特征	应用类型
低强合金	TA2	320	成型、焊接性能好, 耐海水腐蚀	冷成型件、非耐压铸件及管路件
	Ti31	490	成型、可焊性好, 耐 350℃ 海水腐蚀	热交换器、冷凝器、阀门、泵体、管路
	ZTA5	490	铸造性能优良	船舶推进、电子及辅助系统的泵、阀等
	TA5A	590	耐蚀、可焊性好	板材、锻件可用于船舶机械各类部件
中强合金	ZTi60	590	铸造性能好、耐蚀、可焊	各种耐压系统铸件
	Ti70	590	冷成形、焊接、耐蚀性、声学性能好	透声窗、声纳导流罩
	Ti75	630	耐蚀、可焊、成形性能好, 断裂韧性、冲击韧性及应力腐蚀韧性高	通海、低压吹除系统, 耐高压管路, 压力容器, 船舶结构, 推进系统构件等
	Ti91	700	高冷成形、焊接、耐蚀及声学性能	透声窗、声纳导流罩
高强合金	ZTC4	800	抗疲劳、抗裂纹扩展, 铸造性能好	螺旋桨等高强铸件
	TC4	825	优异室、高温性能, 抗疲劳及裂纹扩展能力强, 耐腐蚀、焊接性能优异	船舶部件, 蒸汽透平机叶片, 水中兵器系统发动机外壳、蓄电器等
	TC11	900	高强、高韧	高压压气机转子, 低压压气机轮盘及叶片
	TiB19	1150	高强、良好塑性、较高韧性、可焊	用于船舶机械部件、高压容器
	Ti80	785	耐蚀、可焊;	高压容器、深潜器耐压壳体、结构件
	TB8	825	高的强度、塑性和韧性, 优良耐蚀性	海水管路、弹簧、高强紧固件、弹射装置

钛合金应用的快速发展。

REFERENCES

- [1] 赵永庆, 常辉, 李佐臣, 陈军. 西北有色院创新研制的船用钛合金[J]. 钛工业进展, 2003, 20(6):12-16.
ZHAO Yong-qing, CHANG Hui, LI Zuo-chen, CHEN Jun. Titanium alloys for shipbuilding developed by northwest institute for nonferrous metal research[J]. Titanium Industry Progress, 2003, 20(6): 12-16.
- [2] C. 莱因斯, M. 皮特尔斯. 钛与钛合金[M]. 陈振华, 译. 北京: 化学工业出版社, 2005: 348-350.
LEYENS C, PETERS M. Titanium and titanium alloys[M]. CHENG Zhen-hua, transl. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 348-350.
- [3] 宁兴龙. 俄罗斯舰船用钛[J]. 钛工业进展, 2003(12): 28-31.
NING Zheng-long. Titanium materials for naval ships in russia[J]. Titanium Industry Progress, 2003(12): 28-31.
- [4] 范丽颖, 刘俊玲, 安红. 钛在海洋工程上的应用现状及前景展望[J]. 中国金属通报, 2003(Z2): 25-28.
FAN Li-ying, LIU Jun-ling, AN Hong. Application state and prospects for titanium in sea[J]. China Metal Bulletin, 2003(Z2): 25-28.
- [5] 陈丽萍, 娄贯涛. 舰船用钛合金的应用及发展方向[J]. 舰船科学技术, 2005, 27(5): 13-15.
CHEN Li-ping, LOU Guan-tao. The characteristics and application of titanium alloys in ship[J]. Ship Science and Technology, 2005, 27(5): 13-15.
- [6] 田非, 杨雄辉. 舰艇用钛合金技术应用分析[J]. 中国舰船研究, 2009, 4(3): 77-80.
TIAN Fei, YANG Xiong-hui. Application of titanium alloys in ship building[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2009, 4(3): 77-80.
- [7] 严中令, 刘宝华, 胡耀君. 舰船用 490 MPa 的高塑、高韧性型钛合金[J]. 舰船科学技术, 1991(5): 52-58.
YANG Zhong-ling, LIU Bao-hua, HU Yao-jun. The high plasticity and high toughness in titanium alloy in ship for 490 MPa[J]. Ship Science and Technology, 1991(5): 52-58.
- [8] 孟祥军. 降低钛材价格、促进钛在舰船上的应用[J]. 钛工业进展, 2003, 20(6): 39-41.
MENG Xiang-jun. Decreasing cost of titanium material and promoting its applications in navy shipbuilding[J]. Titanium Industry Progress, 2003, 20(6): 39-41.
- [9] 陈军, 赵永庆, 常辉. 中国船用钛合金的研究和发展[J]. 材料导报, 2005, 19(6): 67-70.
CHEN Jun, ZHAO Yong-qing, CHANG Hui. Research and development of titanium alloy for shipbuilding in China[J]. Materials Review, 2005, 19(6): 67-70.
- [10] 杨蓬勃. 钛合金在船舶上的应用[J]. 广东造船, 2005(3): 30-33.
YANG Peng-bo. Application of titanium alloy employed on ship[J]. Guangdong Ship Building, 2005(3): 30-33.
- [11] 周佳宇, 哈军. 钛合金材料在舰船管系上的应用[J]. 材料开发与应用, 2006: 40-42.
ZHOU Jia-yu, HA Jun. Application of Ti-alloy in the pipeline of naval ship[J]. Development and Application of Materials, 2006: 40-42.
- [12] 谢惠茹. 我国钛及钛合金研发与进展[J]. 稀有金属快报, 2007(8): 8-11.
XIE Hui-ru. Study and progress for titanium and its alloy in China[J]. Rare Metals Letters, 2007(8): 8-11.
- [13] 张文毓. 舰船用水声材料的发展与应用[J]. 舰船科学技术, 2004(8): 67-69.
ZHANG Wen-yu. Development and application of underwater acoustic materials used in the warships[J]. Ship Science and Technology, 2004(8): 67-69.
- [14] 于文艳, 黄渭堂. 钛材在舰船冷凝器中的应用前景[J]. 应用科技, 2000, 27(7): 7-9.
YU Wen-yan, HUANG Wei-tang. Application prospects of titanium in the naval condenser[J]. Applied Science and Technology, 2000, 27(7): 7-9.
- [15] 孙建科, 孟祥军, 陈春和, 刘茵琪. 我国船用钛合金的研究、应用及发展[J]. 金属学报, 2002, 38(增刊 1): 33-35.
SUN Jian-ke, MENG Xiang-jun, CHEN Chun-he, LIU Yin-qi. Research, application and development of ship building titanium alloy in China[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002, 38(z1): 33-35.
- [16] MOURITZET A P. Review of advanced composite structures for naval ships and submarines[J]. Composite Structures, 2001(53): 21-41.
- [17] 孟祥军, 时锦. 漫谈钛合金在舰船上的应用[J]. 钛工业进展, 2003, 20(4/5): 23-26.
MENG Xiang-jun, SHI Jin. Application of titanium alloys for naval vessels[J]. Titanium Industry Progress, 2003, 20(4/5): 23-26.
- [18] 黄晓艳, 刘波, 李雪. 钛合金在舰船上的应用[J]. 南方金属, 2005(6): 10-11.
HUANG Xiao-yan, LIU Bo, LI Xue. Applications of titanium alloys in warship building[J]. Southern Metals, 2005(6): 10-11.
- [19] 张喜燕, 赵永庆, 白晨光. 钛合金及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 295-296.
ZHANG Xi-yan, ZHAO Yong-qin, BAI Cheng-guang. Titanium alloys and application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 295-296.
- [20] 张小明. 钛在船舶上的应用进展[J]. 稀有金属快报, 2000(10): 1-2.
ZHANG Xiao-ming. The application in titanium in ship[J]. Rare Metals Letters, 2000(10): 1-2.
- [21] SCHUTL R W, SCATURRO M R. An overview of current and candidate titanium alloy application on us navy surface ship[J]. Naval Engineers Journal, 1991, 101(3): 175-191.

- [22] 刘茵琪, 孟祥军, 冯岩, 李其民, 郑晓军. TB-19合金腐蚀性能研究[J]. 材料开发与应用, 2003, 18(6): 43-46.
LIU Yin-qi, MENG Xiang-jun, FENG Yan, LI Qi-min, ZHENG Xiao-jun. An investigation on the corrosion behavior of TB-19 alloy[J]. Development and Application of Materials, 2003, 18(6): 43-46.
- [23] 王 镐, 祝建文, 何 瑜, 白 郁. 钛在舰船领域的应用现状及展望[J]. 钛工业进展, 2003(6): 42-44.
WANG Gao, ZHU Jian-wen, HE Yu, BAI Yu. Status and prospect of titanium in ship applications[J]. Titanium Industry Progress, 2003(6): 42-44.
- [24] 张小明. 钛制船只的现状与未来[J]. 稀有金属快报, 2000(1): 27-28.
ZHANG Xiao-ming. The current and future development of titanium alloy in ship[J]. Rare Metals Letters, 2000(1): 27-28.
- [25] 曹楚海. 中国材料的自然环境腐蚀[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 55-56.
CAO Chu-hai. The corrosion in the natural of the material[J]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 55-56.
- [26] 《稀有金属材料加工手册》编写组. 稀有金属材料加工手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1984: 1-3.
Editorial Group of Rare Materials Processing Handbook. Rare metal materials processing handbook[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1984: 1-3.
- [27] 胡耀军. 发展中的船用钛合金[J]. 钛工业进展, 1998(4): 1-5.
HU Yao-jun. The development in shipbuilding titanium alloy[J]. Titanium Industry Progress, 1998(4): 1-5.
- [28] 陈 军, 胡耀军, 李长亮. 一种新型中强冷成形钛合金 Ti91[J]. 稀有金属材料与工程, 2001, 30(增刊 1): 209-211.
CHEN Jun, HU Yao-jun, LI Chang-liang. A new medium strength, cold forming titanium alloy Ti91[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2001, 30(Supple 1): 209-211.
- [29] 卜 敏. Ti70合金板材多点成形性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(增刊 3): 280-282.
BO Min. Study on the multi-point forming of Ti-70 alloy plate[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(Supple 3): 280-282.
- [30] 曹福辛. STi80合金的热成形工艺[J]. 金属学报, 1999, 35(增刊 1): 607-608.
CAO Fu-xin. Hot forming process of STi80 alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1999, 35(S1): 607-608.
- [31] 余 巍, 廖志谦, 孟祥军. 舰船用 STi80 钛合金的电子束焊接工艺[J]. 金属学报, 1999, 35(增刊 1): 677-680.
YU Wei, LIAO Zhi-qian, MENG Xiang-jun. Electron beam welding technique for STi80 titanium alloy for ships[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1999, 35(S1): 677-680.
- [32] 毛彭龄. 新型舰船用钛合金的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2001, 30(增刊 1): 151-153.
MAO Peng-ling. A study of new types of Ti-alloys for the use in ship and warship[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2001, 30(S1): 151-153.
- [33] 孟祥军. 钛合金在舰船上的应用[J]. 舰船科学技术, 2001(2): 23-27.
MENG Xiang-jun. Application of titanium alloys for naval vessels[J]. Ship Science and Technology, 2001(2): 23-27.
- [34] 胡耀军, 刘果宗, 陈 军, 潘志强. 新型船用 Ti-31 合金的研究及应用[J]. 金属学报, 1999, 35(增刊 1): 178-183.
HU Yao-jun, LIU Guo-zong, CHEN Jun, PAN Zhi-qiang. Study and application of a new Ti-31 alloy for shipbuilding[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1999, 35(Supple 1): 178-183.
- [35] 李佐臣, 李长亮, 吴清枝, 赵永庆. 新型船用合金 Ti-75 板材的组织[J]. 金属学报, 1999, 35(增刊 1): 488-490.
LI Zuo-cheng, LI Chang-liang, WU Qing-zhi, ZHAO Yong-qing. Relationship among rolling method and texture and property of Ti-75 alloy plates[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1999, 35(Supple 1): 488-490.
- [36] 赵 彬, 赵永庆, 杨英丽. 热加工工艺对 Ti75 合金管坯组织及性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(增刊 3): 202-204.
ZHAO Bin, ZHAO Yong-qing, YANG Ying-li. Core rod design for pushing Ti-75 titanium ring tube[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(S3): 202-204.

(编辑 赵俊)