

# 深海装备耐压结构用钛合金材料应用研究

蒋鹏, 王启, 张斌斌, 王洋

(中国船舶重工集团公司第七二五研究所, 河南洛阳 471023)

**摘要:** 本文概述了国内外钛合金深海装备的发展现状, 针对深海服役环境特点对耐压结构用钛合金材料的性能要求进行了分析, 介绍了典型装备耐压结构钛合金材料研究应用中出现的应力腐蚀和蠕变等技术问题, 提出需要针对钛合金材料长期服役时存在的组织演变和性能衰减、冲击环境下的动态响应等基础科学问题开展研究, 重点梳理工程应用中的大规格材料、应用评价和高效建造等关键技术。文章建议针对深海领域钛合金装备的迫切需求, 进一步加大钛合金材料基础研究和工程化应用力度, 推动创新应用, 践行海洋强国战略。

**关键词:** 深海装备; 耐压结构; 钛合金; 关键技术

**中图分类号:** S931      **文献标识码:** A

## Application of Titanium Alloy Materials for the Pressure-Resistant Structure of Deep Diving Equipment

Jiang Peng, Wang Qi, Zhang Binbin, Wang Yang

(Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471023, Henan, China)

**Abstract:** The development of titanium alloy deep-diving equipment is first summarized, and the desired properties of titanium alloy materials are then analyzed considering the characteristics of the deep-sea service conditions. Technical challenges faced by the application of deep-diving equipment are also introduced, including stress corrosion, compressive creep, microstructure evolution, property attenuation, and dynamic response under impact loading. Finally, key technologies in engineering application are summarized, such as large-size materials, application evaluation, and efficient construction. To satisfy the urgent demand for titanium alloy equipment in the deep-diving field, we propose to further increase basic research and engineering application of titanium alloy materials, and promote innovative application.

**Keywords:** deep diving equipment; pressure-resistant structure; titanium alloy; key technology

### 一、前言

深海装备包括深海作战军事装备、载人/无人

潜水器、深海空间站与运载平台、水下滑翔机、救生钟等 [1,2], 主要用于资源勘探开发、深海监测和信息网络构建、深海“硬”对抗作战、立体资源补

收稿日期: 2019-06-12; 修回日期: 2019-11-05

通讯作者: 蒋鹏, 中国船舶重工集团公司第七二五研究所研究员, 研究方向为海洋工程用钛合金技术; E-mail: 3350975@qq.com

资助项目: 中国工程院咨询项目“海洋强国战略研究 2035”(2018-ZD-08)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

给等。以深制海，是我国践行海洋强国战略，建设“海上丝绸之路”，实现海军向“近海防卫、远海防御”战略转型的基础和保障。

深海条件下，装备的服役工况和功能要求有很多全新特征。例如，极高海水外压与装备结构应力的叠加，导致耐压结构的受力工况恶劣，甚至接近于材料的屈服点，而装备又需要长期使用和反复上浮下潜 [3]；深海条件下的氧含量降低，对材料表面钝化存在显著影响，加速材料的腐蚀或增大开裂倾向。这些环境特征都对耐压结构材料的安全可靠性设计提出了重大要求。钛合金作为一种轻质、耐海水腐蚀性能优异的结构材料，有望解决深海装备普遍存在的浮力储备不足、长期水中使用时结构安全可靠性欠佳等问题 [4,5]。

钛合金材料应用于耐压结构，与传统的钢材相比，其弹性模量、制造工艺、失效形式都有所不同，目前还存在一些共性基础问题有待突破。同时，在一些工程项目中也提出了许多制约设计、建造和使用的关键技术问题 [6]。本文针对深海钛合金装备的发展现状和存在的材料技术问题开展梳理和探讨，以期促进钛合金材料应用过程中的基础问题研究，通过提升材料韧性和抗蠕变性等关键使用性能，来推动深海装备设计和材料技术的创新发展。

## 二、装备发展情况

### (一) 军事领域

近  $\alpha$  钛合金和超低间隙  $\alpha$  钛合金由于具有高的比强度、良好的冷热成型能力、优异的抗海水腐蚀性能和可焊性，应用方面有逐渐替代船体钢、成为大潜深潜艇耐压壳体的主要结构材料的趋势。据报道 [7]，苏联率先尝试在潜艇耐压壳体上大量使用钛合金，先后建造了 K-162 号、“阿尔法”级、“麦克”级和“塞拉”级等全钛壳体核动力潜艇。美国虽未建造全钛壳体潜艇，但将钛合金大量应用在潜艇桅杆、紧固件等部件上，以减少艇身重量、优化性能 [8,9]。

### (二) 科研和深海探测

钛合金应用于建造载人/无人深潜器的耐压壳体具有得天独厚的优势，尤其是高比强度和抗海水

腐蚀性的特性，在减轻结构重量、降低腐蚀防护成本等方面起到极大作用。目前，许多国家开展了钛合金深潜器的研究和建造工作，领域研究进展显著。

#### 1. 美国

20 世纪 60 年代以前，美国深潜器耐压壳体主要采用高强钢进行建造，如伍兹霍尔海洋研究所 (WHOI) 制造的“阿尔文”号深海载人潜水器。钢铁密度明显高于钛合金，极大限制了“阿尔文”号的下潜深度；另外，“阿尔文”号每年需进行费用高昂的腐蚀防护作业。为此，从 1973 年开始，WHOI 对“阿尔文”号进行重大升级，制造并换用钛合金耐压舱，即利用 Ti-6Al-2Nb-1Ta-0.8Mo 合金替代 HY100 高强钢新建壳体，同时利用 Ti-6Al-4V 合金制作浮力球和高压气瓶。升级改造后的新“阿尔文”号，下潜深度达到 6500 m，作业能力覆盖全球 98% 的海域，完成大量的深海探测工作（累计下潜作业 4600 多次）[7]。

#### 2. 日本

日本较早开展了钛合金载人深潜器的研制，在 20 世纪 80 年代和 90 年代，分别利用超低间隙 Ti-6Al-4V 合金建造了下潜深度为 2000 m 和 6500 m 的载人深潜器。尤其是后者，下潜深度大、覆盖海域范围广，完成多次深海探测任务，为日本的深海开发研究提供了关键手段 [7]。

#### 3. 中国

我国钛合金载人深潜器研究工作起步较晚，但发展速度很快。2003 年开始建造的“蛟龙”号载人深潜器，质量为 22.9 t，耐压壳体内径为 2.1 m，由超低间隙 TC4 合金建造而成。经过国内总体设计单位、装备制造单位、材料（尤其是钛合金）研究单位的通力合作，“蛟龙”号于 2012 年成功完成 7000 m 下潜试验，创造了世界同类作业型潜水器的最大下潜深度纪录。这表明，我国已经掌握相关牌号钛合金的制备、成型及焊接技术，实现壳体的完全自主设计、研发与制造 [7]。我国继续实施具有完全自主知识产权的“深海勇士”号载人深潜器的研制工作，于 2017 年按期完成下潜试验。这表明，我国在深海用钛合金的材料研制及加工工艺开发方面取得重大突破，进入世界先进行列。

此外，法国的“鹦鹉螺”号和俄罗斯的两艘“和平”号载人深潜器也采用了钛合金材料进行建造。世界钛合金载人深潜器发展情况见表 1。

表1 世界钛合金载人深潜器情况一览表

项目	“阿尔文”号	新“阿尔文”号	“深潜6500”号	“蛟龙”号	“深海勇士”号	“鹦鹉螺”号	“和平”号
所属国家	美国	美国	日本	中国	中国	法国	俄罗斯
下潜深度/m	4500	6500	6500	7000	4500	6000	6000
质量/t	17	19.7	25.8	22.9	25	19.5	24
球壳内径/m	1.98	2.1	2.0	2.1	2.1	2.1	2.1
有效载荷/kg	205	180	200	220	220	200	400
服役时间/年	1964	2010	1990	2011	2016	1984	2000

### (三) 油气开采

能源是人类生存和发展所需的最重要资源。由于石化能源的日益消耗,寻找新的可替代能源已经成为关注焦点。地球表面约70%的区域是海洋,海洋中蕴藏着丰富的油气资源,因此加快勘探和开发深海资源迫在眉睫。我国也明确提出“加快建设海洋强国”的发展战略目标。

海洋开发离不开海上钻井平台、深海探测器等重要作业装备,这些装备服役工况恶劣,长期承受海水腐蚀与海浪冲击。钛合金材料因其独特优势,有望广泛应用于上述装备制造领域,但成本问题一直阻碍应用范围的扩展。随着钛合金制备技术的成熟和提升,以及低成本钛合金的研究突破,关于成本因素的顾虑明显降低。美国已将钛合金大范围应用于近海石油平台支柱、板式换热器等;1991年应用到海洋平台提升装置,较好解决了海水条件下的结构腐蚀和疲劳问题;经过综合评估,使用钛合金件已经具有良好的成本经济性[10,11]。我国在西南油气开采装备研制过程中,较大数量地采用高耐 $H_2S+CO_2$ 介质腐蚀的钛合金材料,保证耐蚀性的同时大幅减轻装备重量,取得很好的综合收益。

## 三、材料发展水平

### (一) 材料研究现状

钛及钛合金作为优秀的海洋工程用材料,各国对其研究与应用十分重视,先后研制出了一系列的海洋工程用钛合金。苏联/俄罗斯和美国是最早专门从事海洋工程用钛合金研究的国家,各自形成了海洋工程用钛合金体系。俄罗斯海洋工程用钛合金研究及实际应用水平居世界前列,拥有专门的海洋工程用钛合金系列,形成490 MPa、585 MPa、

686 MPa、785 MPa等一系列强度级别的海洋工程用钛合金产品[12]。美国于20世纪60年代开始研究海洋工程用钛合金技术,研制出钛合金材料系列,建立了完整的海洋工程用钛合金应用考核体系。

### (二) 应对服役环境和结构特征的性能需求

深海装备长期浸泡在海水中,需要承受极高的海水压力载荷、经受住海水腐蚀的考验。深海装备因其长期服役于深海与海面之间,还需要同时承受进港时的近岸海域以及出海时的浅海与深海等多种类型海洋环境的考验,进而对结构的安全性、耐久性、可维修性提出更高要求。在较长的自持条件下还需考虑可能承受的超常规工况,如风暴拍击、物理撞击乃至爆炸冲击等。因此,全海域、全海深、全天候和长时间的运行和极端环境需求,对钛合金材料的性能提出了极高要求。

深海装备的设计既要遵循结构力学、流体力学等基础原理,还要结合工程技术发展现状,适应当前的工业化材料制备技术和造船工艺技术。依据深海装备工况特征,立足材料技术体系现状,钛合金材料应满足如下基本要求。

(1) 材料强度级别满足结构设计要求。根据设计单位的分析结果,耐压结构材料的强度随着下潜深度的增加需要适度提高。综合考虑结构制造、材料塑韧性和工艺性,材料的强度不宜过高,合金选材设计以近 $\alpha$ 型钛合金为主[13]。

(2) 材料在海洋腐蚀环境(如海水、海洋大气等)下具有良好的塑韧性和抗应力腐蚀特性,抗低周疲劳性能好,满足装备长期使用的安全性以及特殊工况要求。

(3) 材料工艺适应性好。匹配船体及船用设备的加工特点,如铸造、锻造、冷热成型,满足

低成本钛合金结构件制造工艺要求,可焊性好,焊后一般无须热处理强化。材料及工艺性能满足舰船设备大型化需求,配套有成型、无损检测等技术。

### (三) 材料韧性制约装备安全性

早期的焊接船体因脆性破坏导致的灾难事故并不少见,这促使设计师采用力学和金属学等方法去分析解决脆性问题。20世纪50年代初,船舶大国即开展了针对船体材料的落锤、动态撕裂、裂纹源爆炸、系列温度的冲击试验等研究,分析材料随环境变化的韧性,评定能否用于制造船体[14]。

目前评价钛合金材料断裂韧性的方法主要有:平面应变断裂韧性、 $J$ 积分、裂纹张开位移 $\delta$ 、夏比冲击断裂韧性 $A_k$ 等。通常,材料的临界应力强度因子 $K_{Ic}$ 与试样厚度 $B$ 、裂纹长度和韧带宽度有关,只有试样厚度满足 $B \geq 2.5(K_{Ic}/\sigma_s)^2$ 时,才能获得稳定的 $K_{Ic}$ 。与 $\alpha+\beta$ 两相钛合金和亚稳 $\beta$ 钛合金相比,由于近 $\alpha$ 钛合金的屈服强度 $\sigma_s$ 较低,而 $K_{Ic}$ 又较高,导致要求的试样厚度较大,不仅耗费大量材料,还要使用大型试验设备。因此,较多通过测量材料的 $J$ 积分临界值 $J_{Ic} = K_{Ic}^2(1-\nu^2)/E$ ,或裂纹尖端张开位移临界值 $\delta_c = K_{Ic}^2/(E\sigma_s)$ ,然后转换为 $K_{Ic}$ 。通过测量或来获得材料的试验周期长、费用高,工程应用上为了快速评价材料的断裂韧性性能,通常采用夏比冲击断裂韧性 $A_k$ ,或根据经验公式由夏比吸收功 $A_k = (4K_{Ic}^2 + \sigma_s^2)/(20\sigma_s)$ 转换成 $K_{Ic}$ 来快速评价材料的断裂韧性[15,16]。

美国采用这类方法评定了几种钛合金材料,以考查对于船体用材的适应性,并参照钢材的破坏分类方法界定了船体用钛的破坏特征。目前已经建立起裂纹临界尺寸( $ac$ )、裂纹体的断裂韧性( $X_c$ )和断裂应力( $\sigma_f$ )之间的关系。在平面应变条件下,若裂纹面垂直于外加应力,则可用张开型平面应变断裂韧性 $K_{Ic}$ 来代替 $X_c$ ,这样韧性值便可用于设计中的定量计算。我国在20世纪60年代也开展了类似研究,后因钛材料暂不用于壳体而中止。

现代船舶设计经验表明,结构材料在强度满足要求时,韧性越高越好。钛合金在海水条件下的应力腐蚀敏感性会增加,冲击和断裂韧性明显体现出差异性。①相同强度等级、不同成分和显微组织的

钛合金,腐蚀疲劳裂纹扩展速率相差超过1倍,应力腐蚀断裂韧性 $K_{ISCC}$ 相差超过50%,两者的共同作用,使得主结构局部疲劳计算寿命相差超过3倍。②相同强度等级、不同牌号钛合金的断裂韧性、冲击韧性相差1.5~2倍,且中、高速变形速率下的变形和断裂特性与低变形速率下的明显不同,这显著影响了装备在极端工况下的破坏模式。

对于深海耐压结构材料的选材设计,近 $\alpha$ 钛合金的强度是满足深海耐压结构轻量化设计的关键因素,断裂韧性则是保证深海耐压结构服役安全可靠性的关键因素[13,17]。遗憾的是,钛合金的强度和断裂韧性通常呈现“此消彼长”的关系。因此,如何快速、准确地对近 $\alpha$ 钛合金的断裂韧性进行评价,以及在保证合金强度的前提下尽可能提高其断裂韧性,成为未来的重点研究方向。

## 四、材料基础性问题

### (一) 长期服役环境下钛合金组织演变与性能衰减规律

在应力场和腐蚀场的长期作用下,钛合金在宏观尺度上表现出损伤与断裂加速现象。关于这一现象的研究:①在介观尺度上,深海环境长期作用下钛合金钝化膜动态溶解愈合规律仍在探索;②在微观尺度上,长期高应力载荷作用下钛合金的微观组织结构演化及其对裂纹加速扩展的影响机制尚不明确;③在宏观尺度上,主结构用钛合金的载荷-时间-损伤规律缺乏足够的数据积累。因此,研究并解析钛合金的组织演变、性能衰减及其微观机制,对于提升钛合金的损伤抵抗能力、深海装备主结构安全性具有重要意义。

### (二) 冲撞条件下钛合金动态响应及裂纹萌生扩展机制

深海装备在服役过程中面临着冲击、碰撞等偶然现象,研究不同应变速率下钛合金变形损伤与动态断裂特性,对于材料性能提升、结构安全优化具有重要意义。在不同载荷速率下,钛合金的微观变形机制以及裂纹萌生和扩展方式差异较大,导致钛合金表现出较明显的宏观力学性能和损伤特征差异,进而显著影响结构的断裂模式。目前,针对钛

合金在中、高速动载条件下动态响应及失效机制,包括微观组织损伤、裂纹萌生扩展、动态断裂韧性等研究正在开展,同时包括服役环境的动态断裂特性等表征方法等也在进行。

### (三) 钛合金在深海耐压结构上应用可能存在的蠕变问题

与结构钢相比,钛合金在深海耐压结构的应用过程中存在明显的压缩蠕变效应,降低了钛合金耐压结构的服役可靠性 [18,19]。蠕变效应主要归因于两方面:①钛合金的弹性模量较低,约为钢的一半,导致在承受相同强度载荷下,钛合金出现的弹性应变变量约是钢的2倍;②钛合金组织中 $\alpha$ 相为密排六方结构,存在明显的各向异性和包申格效应。目前,关于钛合金蠕变行为的研究,主要集中在以航空航天飞行器为应用背景的高温拉伸蠕变行为方面,有关深海耐压结构钛合金的压缩蠕变行为的研究较少。国内正在组织开展钛合金在海水腐蚀介质中、近屈服应力强度水平下的压缩蠕变行为研究,以尽快揭示深海耐压结构钛合金的压缩蠕变损伤机理。

## 五、材料工程化关键技术

### (一) 大规格板材和配套材料技术

深海装备耐压结构主要通过中厚钛合金板材进行曲面成形后组焊而成,对大规格钛合金板材和配套焊丝材料的制备技术要求较高。由于钛及钛合金板坯具有热加工温度区间窄、温降快、高温吸氢吸氧、变形抗力随温度变化大、容易开裂等特点,因而轧制温度控制要求非常严格,导致钛及钛合金中厚板在热轧生产线组建、稳定轧制工艺、提高产品尺寸精度等方面具有一定的难度。

目前钛及钛合金中厚板材主要使用钢铁加工设备进行生产,这些轧机生产线是基于钢铁材料的特性来设计的,缺乏对于钛及钛合金材料生产的针对性设计,不能很好地适应钛及钛合金的加热特性和加工特性,使得成品质量不是十分理想 [20]。相关单位需要针对钛合金大规格板材性能均匀性、稳定性、批量一致性的技术难题开展技术攻关,研究高性能大规格钛合金板材成形和组织性能优化方法,促进大规格钛合金板材性能全面升级,满足深海工程领域的需求并支撑其发展 [21]。

### (二) 选材和应用考核评价

工程设计和建造要求制定科学的评价体系,有关材料制备、建造和使用方面的材料理化指标及使用性能必须量化可考核。这方面的基础较薄弱,成为制约钛合金材料在深海装备应用的重要因素之一。

考虑承压要求,深海耐压结构的选材设计倾向于更高强度的钛合金材料;而从载人球壳结构安全性考虑,要求钛合金材料既具有足够的强度,还要有适当断裂韧性。许多海难事故都与建造材料断裂韧性储备不足有关,例如“泰坦尼克号”海难就是由于所用钢的低温冲击断裂韧性太低所导致的。由于深海耐压结构长期在海水中使用,还需要计及材料在海水介质中的应力腐蚀临界强度因子。从建造工艺角度出发,钛合金材料应具有良好的冲压成形性能和焊接性。

整体而言,在材料制备和工艺研究阶段,需要建立完整的用于耐压结构的钛合金材料评价体系,明确在材料制备和建造过程中的材料基本性能指标和应用性能考核方式,确保钛合金材料在建造过程中的质量稳定性,据此满足装备在长期使用工况和极限条件下的可靠性要求。

### (三) 高效优质建造技术

深海耐压结构形式主要是环肋圆柱壳体和球形封头结构,具有结构尺寸大、尺寸精度要求高等突出特点,而现有钛合金工艺尚无法完全满足要求。大型船体结构的焊接工作量占到船厂总装工作量的一半以上,这充分体现了突破钛合金高效建造技术的必要性。

钛合金大厚板焊接方法分为电子束焊接、窄间隙填丝焊接。电子束焊接自动化程度高、焊接速度快,具有工期短、工艺稳定、效率高的特点;但钛合金材料焊缝熔合区冷却速度较快,焊缝的韧性略低;受设备条件限制,大型和复杂形状构件的焊缝不易实现。窄间隙填丝焊接周期长,对焊接技术人员的综合素质要求较高,工艺影响因素多。现有的工程化技术效率较低、建造适应性差 [22],需要开发效率更高、更为稳定的高适应性和智能化钛合金材料焊接技术。

海洋环境中的钛合金装备需要配套的其他技术也需要尽快开展研究。船体各部件和设备、管路之

间的连接因为材料牌号不同, 不可避免地存在异种金属的电化学腐蚀问题; 采取有效的电绝缘或补偿措施是工程应用中必须考虑的技术问题。钛合金材料生物相容性好, 海洋环境中的海生物附着和生长现象会导致管路堵塞、重量增加以及其他不良影响, 需要具有解决长效防污问题的实用手段。

## 六、结语

钛合金材料在以载人深潜器为代表的深海装备耐压结构上的成功使用, 为深海领域的装备选材和创新应用提供了良好示范。

面对我国未来海洋强国建设需要更多类型钛合金深海装备的趋势, 我们建议: 行业部门深化合作与科学分工, 打牢钛合金材料基础研究, 突破用于深海耐压结构的钛合金材料强韧化、耐腐蚀等机理机制, 优化钛合金板材大厚度焊接等工程化技术, 建立极端工况下的钛合金结构考核评价体系, 化解制约应用的安全可靠性风险。通过深海装备顶层需求-总体设计-材料工艺等各个环节的共同努力, 为加速我国深海领域研究和应用创新奠定坚实基础。

### 参考文献

- [1] 杨磊, 杜志元, 陈云赛, 等. 我国三类典型深海运载装备应用技术研究 [J]. 海洋开发与管理, 2018, 35(9): 100-106.  
Yang L, Du Z Y, Chen Y S, et al. The operation and application technology of China's three typical deep-sea submersibles [J]. Ocean Development and Management, 2018, 35(9): 100-106.
- [2] 赵羿羽, 曾晓光, 郎舒妍. 深海装备技术发展趋势分析 [J]. 船舶物资与市场, 2016 (5): 42-45.  
Zhao Y Y, Zeng X G, Lang S Y. Analysis of the development trend of deep-sea equipment technology [J]. Marine Equipment/Materials & Marketing, 2016 (5): 42-45.
- [3] 屈平. 深海钛合金耐压结构蠕变特性探索研究 [D]. 北京: 中国舰船研究院 (硕士学位论文), 2015.  
Qu P. Exploratory study of the creep characteristic for titanium deep-sea pressure shell [D]. Beijing: China Ship Research Institute (Master's thesis), 2015.
- [4] 李献军, 王镛, 冯军宁, 等. 钛在海洋工程领域应用现状及发展趋势 [J]. 世界有色金属, 2014 (9): 30-32.  
Li X J, Wang G, Feng J N, et al. Application status and development trend of titanium in ocean engineering [J]. World Nonferrous Metals, 2014 (9): 30-32.
- [5] 王镛, 李献军. 钛在海洋工程应用的最新进展 [J]. 中国钛业, 2012 (1): 11-14.  
Wang G, Li X J. New developments of titanium in ocean engineering application [J]. Chinese Titanium Industry, 2012 (1): 11-14.
- [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 F, Yang X H. Application of titanium alloys in ship building [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2009, 4(3): 77-80.
- [7] 于宇, 李嘉琪. 国内外钛合金在海洋工程中的应用现状与展望 [J]. 材料开发与应用, 2018, 33(3): 111-116.  
Yu Y, Li J Q. Current application and prospect of titanium alloys in marine engineering [J]. Development and Application of Materials, 2018, 33(3): 111-116.
- [8] 雷家峰, 马英杰, 杨锐, 等. 全海深载人潜水器载人球壳的选材及制造技术 [J]. 工程研究, 2016, 8(2): 179-184.  
Lei J F, Ma Y J, Yang R, et al. Material and fabrication of the personnel hull for full ocean depth submersible [J]. Journal of Engineering Studies, 2016, 8(2): 179-184.
- [9] 石佳睿, 唐文勇. 载人深潜器钛合金耐压球壳极限强度可靠性分析 [J]. 船海工程, 2014, 43(2): 114-118.  
Shi J R, Tang W Y. Ultimate strength reliability analysis of titanium alloy spherical pressure shell in HOV [J]. Ship & Ocean Engineering, 2014, 43(2): 114-118.
- [10] 刘强, 惠松骁, 宋生印, 等. 油气开发用钛合金油井管选材及工况适用性研究进展 [J]. 材料导报, 2019, 33(5): 841-853.  
Liu Q, Hui S X, Song S Y, et al. Materials selection of titanium alloy OCTG used for oil and gas exploration and their applicability [J]. Materials Review, 2019, 33(5): 841-853.
- [11] 吴欣袁, 张恒, 徐学军, 等. 钛合金在石油天然气勘探开发中的应用 [J]. 石油化工应用, 2016, 35(11): 105-108, 113.  
Wu X Y, Zhang H, Xu X J, et al. Application of titanium alloy in oil & gas exploration and development [J]. Petrochemical Industry Application, 2016, 35(11): 105-108, 113.
- [12] 冯雅奇, 贾栓孝, 王韦琪, 等. 深潜器载人舱用TC4 ELI钛合金半球壳的研制 [J]. 钛工业进展, 2016, 33(1): 19-22.  
Feng Y Q, Jia S X, Wang W Q, et al. Development of TC4 ELI titanium alloy hemisphere shell for manned submersible [J]. Titanium Industry Progress, 2016, 33(1): 19-22.
- [13] Goode R J, Huber R W. Fracture toughness characteristics of some titanium alloy for deep-diving vehicles [R]. Washington, DC: The US Naval Research Laboratory, 1965.
- [14] Duan Q Q, Qu R T, Zhang P, et al. Intrinsic impact toughness of relatively high strength alloys [J]. Acta Materialia, 2018, 142(1): 226-235.
- [15] Pellini W S. Principles of structural integrity technology [R]. Arlington: Office of Naval Research, 1976.
- [16] Loss F J. Ductile fracture test methods [R]. Washington, DC: US Nuclear Regulatory Commission, 1985.
- [17] Tran J. Titanium by design: TRIP titanium alloy [D]. Evanston: Northwestern University (Doctoral dissertation), 2009.
- [18] Omprakash C M, Satyanarayana D V V, Kumar V. Effect of microstructure on creep and creep crack growth behaviour of titanium alloy [J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2010, 63(2-3): 457-459.
- [19] Jaworski A, Ankem P S. Influence of the second phase on the room-temperature tensile and creep deformation mechanisms of  $\alpha$ - $\beta$  titanium alloys, part II: Creep deformation [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2006, 37(9): 2756-2765.

- [20] 胡付立, 刘建良, 陈敬超. 钛及钛合金热轧中厚板轧机选择及高效使用 [J]. 云南冶金, 2012, 41(33): 52-55.  
Hu F L, Liu J L, Chen J C. Rolling mill selection for hot-rolled medium and heavy plate of titanium and titanium alloy and its efficient use [J]. Yunnan Metallurgy, 2012, 41(33): 52-55.
- [21] 吴文琥, 高文超, 刘璇, 等. 大规格TC4钛合金板坯的制备 [J]. 热加工工艺, 2017, 46(7): 183-185.  
Wu W H, Gao W C, Liu X, et al. Preparation of large size TC4 alloy slab [J]. Hot Working Technology, 2017, 46(7): 183-185.
- [22] 肖伟星. 船用钛合金材料焊接中的常见问题与对策 [J]. 中国设备工程, 2019 (2): 188-189.  
Xiao W X. Common problems and countermeasures in welding of marine titanium alloy materials [J]. China Plant Engineering, 2019 (2): 188-189.