

引用格式: 贾蔚菊, 李思兰, 毛成亮, 等. 舰船与能源装备用钛合金研究进展[J]. 中国材料进展, 2025, 44(6): 530-539.  
JIA W J, LI S L, MAO C L, *et al.* Research Progress of Titanium Alloys for Ships and Energy Equipment[J]. Materials China, 2025, 44(6): 530-539.

## 特约专栏

# 舰船与能源装备用钛合金研究进展

贾蔚菊, 李思兰, 毛成亮, 李倩, 张思远, 王佳璐, 郭荻子, 赵永庆  
(西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

**摘要:** 钛具有比强度高、耐腐蚀、耐高温、无磁等特点, 特别是具有良好的耐海水和海洋大气腐蚀性能, 是理想的海洋工程用材料, 被誉为“海洋金属”。我国从20世纪60年代开始开发舰船用钛合金, 形成了不同强度级别的钛合金牌号, 在能源开采装备用钛材的研究和应用方面起步较晚, 目前仍处于起步阶段。随着建设海洋强国战略的提出, 我国海洋发展从浅海走向深海、远海, 钛及钛合金在海洋工程领域应用的优势更加凸显出来。从舰船用钛合金和能源装备用钛合金两个方面介绍了我国海洋工程领域用钛合金材料的研究现状, 简述了海洋工程领域用大规格钛合金铸锭及构件制备技术、低成本制备技术及能源开采装备用钛合金无缝管材制备技术等方面的研究进展, 并提出了目前存在的主要问题, 以期为舰船及能源装备用钛合金材料及其构件制备技术的研究提供参考。

**关键词:** 舰船用钛合金; 能源装备用钛合金; 大规格铸锭; 低成本技术; 无缝管材

**中图分类号:** TG146.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2025)06-0530-10

## Research Progress of Titanium Alloys for Ships and Energy Equipment

JIA Weiju, LI Silan, MAO Chengliang, LI Qian, ZHANG Siyuan,  
WANG Jialu, GUO Dizi, ZHAO Yongqing  
(Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

**Abstract:** Titanium has the characteristics of high specific strength, corrosion resistance, high temperature resistance and non-magnetic properties, especially good resistance to seawater and marine atmospheric corrosion. It is an ideal material for marine engineering and is known as the “marine metal”. China began developing titanium alloys for ships in the 1960s, forming titanium alloy grades with different strength levels. The research and application of titanium materials for energy extraction equipment started relatively late and is still in its infancy at present. With the proposal of maritime power strategy, the country's marine development is advancing from shallow to deep and distant seas, further highlighting the advantages of titanium and titanium alloys in marine engineering applications. This article introduces the current research status of titanium alloy materials used in the field of marine engineering in China from two aspects: titanium alloys for ships and titanium alloys for energy equipment. It briefly describes the research progress in the manufacturing of large-sized titanium alloy ingots and components, low-cost production techniques, and the preparation technology of seamless tubes for energy extraction equipment. The main existing problems at present are also proposed, with the expectation of providing references for research on the preparation technology of titanium alloy materials and their components for ships and energy equipment.

**Key words:** titanium alloy for ships; titanium alloy for energy equipment; large-scale ingots; low-cost technology; seamless tubes

收稿日期: 2025-03-20 修回日期: 2025-05-22

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFB3700802)

第一作者: 贾蔚菊, 女, 1981年生, 正高级工程师, 硕士生导师,

Email: diana\_1025@126.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202503022

## 1 前言

钛材因具有比强度高、耐腐蚀、耐高温等优异的性能, 广泛应用于航空、航天、兵器、海洋、化工、医疗等领域<sup>[1, 2]</sup>。高的比强度是钛材在航空航天领域应用的最大优势, 提高钛材在飞行器上的应用比例可大幅减少

飞行器重量,提高其技战术水平。为了提高钛材在飞行器上的应用比例,根据不同构件服役工况性能需求,发展出了低温钛合金、高温钛合金、损伤容限钛合金、阻燃钛合金、高强韧钛合金等不同种类的钛合金。而海洋工程用钛材长期处于海水、海洋大气环境中,减重和耐腐蚀是其主要目的。与航空航天用钛材类似,根据不同的使用工况,对海洋工程用钛材也进行了分类,包括低强钛合金、中强钛合金和高强钛合金。对于普通的水面船只或舰艇,大部分使用的是纯钛,纯钛具有最好的耐腐蚀性及可焊接性;而对于深海装备或海洋工程装备来说,更为苛刻的服役工况对材料的强韧性、耐蚀性、抗疲劳性等提出了更高的要求,从而促进了海洋工程用中强高韧和高强高韧钛合金的发展。近年来在国家建设海洋强国、发展深海经济的战略驱动下,舰船、深海装备等向着大型化、大深度、全海域等方向发展,对大规格钛构件的需求越来越多,对钛材的成型性、可焊性等工艺性能也提出了更高的要求。

本文简介了舰船和能源装备用钛合金材料的研制情况,对舰船及能源装备用钛材的大规格铸锭及构件制备技术、低成本制备技术、无缝管材制备技术等方面的研究进展进行了概述,并提出了目前存在的主要问题,以期对钛材相关科研人员及从业者提供参考,进一步推动钛材在海洋工程领域的应用。

## 2 舰船及能源装备用钛合金研究

### 2.1 舰船用钛合金

钛合金在舰船上的主要应用部位包括耐压壳体、海水管路系统、热交换器、冷却器、各类管接头、发动机零部件、升降装置及发射装置等。俄罗斯和美国是最早从事舰船用钛合金研究的国家,并形成了各自的舰船用钛合金体系。俄罗斯在舰船用钛的研制和实际应用水平方面居世界前列,拥有不同强度级别的船用钛合金,并对这些钛合金按照用途进行了分类,也是目前唯一拥有全钛潜艇的国家。我国从 20 世纪 60 年代开始开发舰船用钛合金,目前已形成强度范围在 320~1250 MPa 的船用钛合金系列,主要牌号包括低强的 TA2、Ti31 等合金,中强的 Ti70、Ti75、Ti91 等合金,高强的 TC4、Ti80、TC11、Ti62A、Ti-B19、Ti-B25 等合金。从合金类型上看,低强和中强舰船用钛合金通常为  $\alpha$  和近  $\alpha$  型钛合金,高强舰船用钛合金为  $\alpha+\beta$  或近  $\beta$  型钛合金。低强钛合金具有高塑性、可焊接性好等特点,易加工成薄壁管,适用于各类热交换器、冷却器等管材制备;中强钛合金综合性能匹配较好,适用于大厚截面构件、通海管路等;高强钛合金具有强度高、塑性低等特点,适用于耐压壳

体、高压容器、船舶特种部件等<sup>[3,4]</sup>。

对于普通船用钛合金结构件,考虑到材料的强韧性匹配、应力腐蚀断裂韧性、焊接性等,材料的强度水平不宜过高,尽量选择应用较为成熟的近  $\alpha$  型钛合金,但对于有特殊强度要求的结构件,就必须选择高强钛合金。随着海洋装备向深蓝发展,对深潜器、深空站等耐压结构用钛材的性能提出了更高的要求,促进了海洋用高强钛合金的发展。提升材料的强度可以降低构件截面厚度和耐压结构重量,然而强度的提高往往要牺牲材料的韧性<sup>[5]</sup>,因此在保持较高强度的同时具有良好的韧性是舰船用高强钛合金获得应用的关键,高强韧钛合金也成为近年来各研究院所及钛企的研究热点。研究思路从两个方面开展,一方面是面向国家重大工程急需,设计单位更加倾向选用较为成熟的钛合金材料,通过优化合金成分及构件的制备工艺来挖掘材料的性能潜力,提高合金的强韧性匹配。较多研究集中在针对应用成熟的 TC4 合金和 Ti80 合金开展优化设计。另一方面是借鉴航空航天高强韧钛合金开发理念,研发新型的海洋工程用高强韧钛合金。

“十三五”期间,西北有色金属研究院(西北院)以 Ti80 合金为基础,开展了合金成分优化设计研究,旨在保持合金较高强度的基础上提升合金的韧性。采用余氏理论(Yu Rui-huang electron theory)计算与试验相结合的方法,系统研究了  $\alpha$  稳定元素、 $\beta$  稳定元素及间隙元素对 Ti80 合金强韧性的影响规律,并结合余氏理论计算揭示了元素影响合金强韧性的微观机理<sup>[6-9]</sup>。深入研究了在 Ti-6Al 合金中添加 Mo 和 Nb 元素后合金的强韧性变化规律,发现 Mo 和 Nb 元素对合金的室温拉伸性能影响较小,可显著提升合金的冲击韧性,这主要归因于  $\beta$  稳定元素的添加改变了显微组织中的相构成,在冲击载荷下激发了更多的位错和形变孪生,消耗了更多的冲击载荷,从而提高了合金抵抗裂纹扩展的能力,使合金获得了较高的冲击性能<sup>[10]</sup>。研究了 O 元素含量对不同组织结构 Ti80 合金棒材冲击性能的影响,发现冲击性能对合金中 O 元素含量比较敏感。通过调控各元素含量及热处理制度发现,退火状态下 Ti80 合金具有最佳的强韧性匹配,其显微组织是由等轴初生  $\alpha$  相和  $\beta$  转变组织构成的双态组织,如图 1 所示。图 2 是 O 含量对双态组织 Ti80 合金屈服强度和冲击功的影响规律,可得 O 含量为 0.1% (质量分数)时,合金屈服强度达 800 MPa,冲击功可达 72 J(测试标准 GB/T 229—2020)。

深潜器耐压壳体是深海装备用高强韧钛合金的典型代表,深潜器下潜深度与材料的比强度密切相关。美国 Alvin 号通过将耐压壳体材料由钢材更换为钛材,其最大

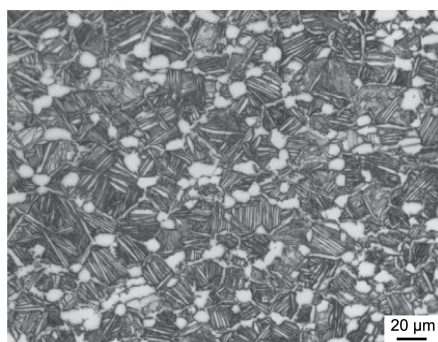


图 1 Ti80 合金的双态组织形貌

Fig. 1 The microstructure of the bimodal Ti80 alloy

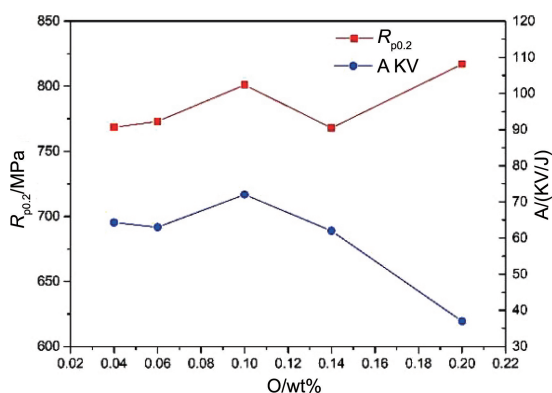


图 2 O 元素含量对 Ti80 合金强韧性的影响

Fig. 2 The influence of oxygen on the strength and toughness of Ti80 alloy

潜深由 1868 提升至 4500 m, 进一步采用钛合金改装后其设计深度提升至 6000 m<sup>[11]</sup>。纵观各国深潜器耐压壳体的选材可见, 钛材的主要牌号为 Ti-6Al-4V (TC4)、Ti-6Al-4V ELI (TC4 ELI), 采用这 2 种合金制备的 3 人舱深潜器下潜深度均不大于 7000 m。2017 年, 我国自主研发并成功建造了 TC4 ELI 合金载人球壳和 Ti80 合金载人球壳, 将 TC4 ELI 的载人球壳成功装配于深海勇士号, 其最大下潜深度为 4500 m。我国从俄罗斯引进的瓜瓣成型的 TC4 ELI 载人球壳的最大下潜深度为 7000 m。采用 Ti62A 合金制备的“奋斗者”号 3 人舱深潜器下潜深度可达 10 909 m<sup>[12]</sup>。Ti62A 合金是中国科学院金属研究所和宝鸡钛业股份有限公司共同研发的高强度高韧损伤容限型钛合金, 该合金强度较 TC4 合金有较大提升, 同时保持了较好的韧性和可焊性<sup>[13, 14]</sup>。宝鸡钛业股份有限公司等单位在 Ti62A 合金基础上进行了性能优化研究, 开发了 Ti542222 钛合金, 该钛合金屈服强度指标为 1000 MPa, 冲击功为 40 J, 采用双重退火处理后, 具有最佳强度-塑性-韧性匹配<sup>[15]</sup>。

在国家相关项目的支持下, 西北院、中国船舶重工集团公司第七二五研究所 (七二五所) 等单位已成功研制出屈服强度为 800, 900 和 1000 MPa 级的钛合金<sup>[16]</sup>。

西北院自主研发了一种高强  $\beta$  型钛合金 Ti-B25, 该合金具有强度高、冷加工性能好等特点, 已在舰船通信系统上批量应用<sup>[17]</sup>。中国科学院金属研究所针对海洋工程用钛研发了 1000 和 1200 MPa 强度级别的高强度高韧钛合金, 已小批量制备了深渊原位科学实验站用钛合金壳体、深渊滑翔机钛合金壳体, 基本替代了 Ti64 合金<sup>[13]</sup>。

近几年我国也将增材制造技术引入深海装备制造中, 中国船舶集团汾西重工有限责任公司联合西安铂力特采用激光熔融沉积技术 (laser melting deposition, LMD) 试制了钛合金螺旋桨、空心壳体等<sup>[18]</sup>。中国科学院金属研究所联合上海科技大学采用增材制造、粉末热等静压工艺研制了多种深海工程钛合金部件, 基于高过冷度成分设计思路及高强钛合金强韧化方法, 研发了适用于增材制造工艺的弱织构、等轴晶钛合金成分体系, 使增材制造钛合金实现了优异的强度、塑性匹配及力学性能各向同性<sup>[13]</sup>。

“十四五”期间, 西北院依托国家重点研发计划项目子课题“深海极端服役环境用高强韧钛合金成分优化和制备”, 基于高强韧钛合金 Ti1300 和 Ti5321 合金<sup>[19]</sup>, 开发了深海装备用超高强钛合金 Ti1300G 和深海装备增材制造用高强韧钛合金 Ti5321G。Ti1300G 合金耐压壳体屈服强度可达 1250 MPa, 延伸率  $\geq 9\%$ , 冲击功  $\geq 24$  J, 断裂韧性  $\geq 60$  MPa  $\cdot$  m<sup>1/2</sup>; Ti5321G 合金增材制造构件屈服强度可达 1050 MPa, 延伸率  $\geq 9\%$ 。采用 Ti1300G 合金制备了深海滑翔机用耐压壳体构件, 采用 Ti5321G 合金制备了深海 ROV 推进器螺旋桨和实验操作机械手臂, 目前耐压壳体正在等待装机后测试, ROV 已在南海顺利通过海试实验。

## 2.2 能源装备用钛合金

钛合金在能源开采领域可应用于换热器、输送管线、管道、油井管、紧固件、连接件及海洋钻井设备支持结构等<sup>[20]</sup>。国际上从事钛合金油井管制备和研究的国家包括美国、俄罗斯、日本等, 主要采用的合金牌号为 TC4、TC4 ELI、Ti6246、Ti38644 等。我国油气开采领域用钛合金的应用起步较晚, 使用的钛材也是在航空航天领域应用成熟的牌号, 包括 TA1、TA2、TA10、TA18、TA25、TA26、TC4 ELI、TC4、TA31 (Ti80)、TB9 等, 主要应用于热交换器、管线、紧固件等。钛合金油井管的研制及应用目前仍处于起步阶段, 2020 年, 由中国石油集团石油管工程技术研究院牵头研制的国产 105 ksi 级钛合金钻杆, 在西部油田顺利完成了井深为 7100 m 的超短半径水平井的三开定向造斜侧钻任务并成功出井, 实现了 724 MPa 级钛合金钻杆应用技术的突破<sup>[21]</sup>。针对 110 钢级的钛合金油管, 中国石油集团工程材料研究院有限公

司、七二五所、宝鸡钛业股份有限公司、忠世高新新材料有限公司等单位均开展了较多的研究工作，其中七二五所、天津钢管集团公司等采用 TA31 (Ti80) 合金研制的 TP-Ti-110 钢级 TP-G2 (Ti) 气密封特殊螺纹钛合金油管在元坝气田两口井成功全井应用，是钛合金油管首次在超深高含硫气井中应用，累计用量长度约 12 500 m，质量约 120 t<sup>[22, 23]</sup>。

近十几年来，围绕钻杆和油套管用钛合金材料的研制主要是基于成熟的 TC4 合金和 Ti80 合金开展成分优化设计研究，以期这类成熟的合金能够更加适用于苛刻钻采环境的复杂服役工况。中国有研科技集团有限公司等通过在 TC4 合金中添加 Nb 和 Ni 元素获得了一种油井管用 Ti-6Al-4V-0.5Nb-0.5Ni 合金，具有良好的耐腐蚀性能<sup>[24]</sup>。中南大学、宝鸡钛业股份有限公司等在 TC4 合金基础上开发了 TC4S 低成本钛合金<sup>[25, 26]</sup>。北京科技大学在 TC4 合金成分基础上，通过添加不同的合金元素，开发了 TC4-RuBi 和 TC4-NiNb 合金<sup>[27]</sup>。

依托“十三五”国家重点研发计划项目，西北院以 Ti80 合金为基础，开展了针对油气开采服役环境应用的高耐蚀高强韧低成本钛合金成分优化设计研究。采用电化学和全浸腐蚀试验相结合的方法，研究了 Mo, Nb, Zr, Al, O 等元素含量对二、三元合金及 Ti80 等近  $\alpha$  钛合金在 5 mol·L<sup>-1</sup> 盐酸溶液中腐蚀行为的影响规律。从提高合金耐蚀性的角度出发对合金的成分进行了优化设计，并建立了合金制备工艺-显微组织-力学性能-耐蚀性能的关系，获得了合金在模拟不同使用工况下的腐蚀速率，结果表明该合金具有优异的耐蚀性。采用该合金制备的无缝管材，在屈服强度大于 800 MPa 的同时在 -10 °C 的冲击功可达 42 J。同期，开发了一种 Ti-Al-Sn-Zr-Mo-V-Nb 系高强韧耐蚀钛合金，该合金具有良好的加工成型性及耐蚀性，力学性能可调范围较宽<sup>[28, 29]</sup>。

“十四五”期间，国家重点研发计划项目“苛刻环境能源井钻采用高性能钛合金管材研发及应用”对钛合金油管的性能要求进一步提高，要求其室温屈服强度不小于 900 MPa，抗拉强度不小于 965 MPa，延伸率不小于 12%，纵向冲击功不小于 50 J。西北院依托该项目，基于前期研究基础，从提高合金强度和冲击韧性的角度出发，研发出了新型的适用于油气钻采服役环境的 900 MPa 级 Ti90 合金。系统研究了该合金的变形行为并构建了其本构方程，对不同加工状态合金在 5 mol·L<sup>-1</sup> 盐酸溶液中的腐蚀行为进行了研究，获得了棒坯、斜轧穿孔管坯及挤压管材等不同状态 Ti90 合金的腐蚀速率（图 3），并揭示了其微观腐蚀机理<sup>[30, 31]</sup>。

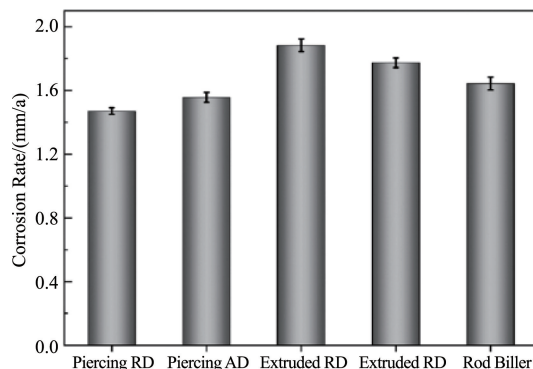


图3 不同状态 Ti90 合金管材的腐蚀速率<sup>[30]</sup>

Fig. 3 Corrosion rates of Ti90 alloy tubes in different states<sup>[30]</sup>

### 3 舰船及能源装备用钛材制备技术

#### 3.1 大规格钛铸锭及构件制备技术

舰船和海洋装备发展的一个显著特点是大型化，这对钛材结构件的规格尺寸也提出了更高的要求，相应的对钛合金大规格铸锭的熔炼技术，大规格坯料的锻造、轧制、焊接、加工等一系列技术均提出了严峻的挑战。钛材生产是一个资本和技术密集型行业，要实现钛材构件的大型化、整体化制备，一方面是装备能力能够达到，另一方面是大规格钛材的制备技术要跟上。近年来，随着我国航空航天、海洋工程等高端制造业的快速发展，对高品质钛材的需求不断增加，推动了钛材生产企业大型设备的更新和升级。我国主要钛材生产企业在大型设备方面已达到国际先进水平，形成了完整的生产体系。对于超大卷重钛带、超长钛管及型材、超大规格钛板等，通过与钢厂合作，借助钢厂大型设备可实现超大规格构件的制备。

获得大规格钛锻件的前提是制备出大规格钛铸锭，而随着铸锭规格的增大，其成分及缺陷的控制难度也逐渐增加。各家钛企通过软件模拟结合试制、工业化生产等，已掌握了主要合金元素的分布特征及易偏析元素的偏析规律等，通过原材料控制以及中间合金添加方式、熔炼工艺参数优化等手段相结合，突破了大规格钛合金铸锭的高均质熔炼技术<sup>[32-35]</sup>，实现了 Ti-1023 等易偏析钛合金 3~5 t 级高均质铸锭的工业化制备，TC4、Ti80 等常规钛合金 15 t 级大规格铸锭的高均质制备。图 4 为西部超导材料科技股份有限公司制备的 15 t 级 Ti80 合金铸锭，铸锭成分均匀性良好，铸锭纵向各主元素极差均控制在 0.1% 以内，铸锭横向主元素极差在 0.25% 以内。在电子束冷床炉 (electron beam cold hearth melting, EB) 熔炼方面，设备能力持续增强，掌握了 TC4 等简单合金的成分精度及均匀性控制技术，而对于复杂多组元钛合金生产较少，基本仍处于试制阶段。



图 4 西部超导材料科技股份有限公司制备的 15 t 级 Ti80 合金铸锭  
Fig. 4 The 15 t ingot of Ti80 alloy prepared by Western Superconducting Technologies Co., Ltd.

在大型钛合金构件制备方面,各家钛企针对大规格板材、饼材、环材、管材等均开展了大量研制工作,掌握了 TA5、TC4、TA24、TC11、TC16 等钛合金大规格板材、饼材、环材等的制备技术<sup>[36, 37]</sup>,相关产品也在船舶上批量应用。近年来,舰船及海洋装备用大规格板材的需求量较大,促使各家钛企在大规格板材制备技术方面开展了大量的攻关,使大规格板材的制备技术显著提升。“十三五”期间,我国突破了宽幅超厚高强高韧钛合金板坯制备技术,制备出厚度为 130 mm、宽度大于 3000 mm 的宽幅高强高韧钛合金板坯,并成功将它应用于“奋斗者”号潜水器;攻克了超大规格板坯组织均匀性及晶粒尺寸控制技术、超大规格板材强韧性及各向异性调控技术等,可制备规格为 50 mm×(≥2500 mm)×(≥16 000 mm) 的板材,具备工业化批量生产能力。图 5 是西部钛业有限责任公司生产的海洋用 TC4 合金超大规格板材。

针对超大规格板材制备国内也提出了一些创新性的方法,比如西部金属材料股份有限公司公布了“一种超大



图 5 西部钛业有限责任公司生产的海洋用 TC4 合金超大板材  
Fig. 5 Extra-large marine used TC4 alloy plates produced by Western Titanium Technologies Co., Ltd.

规格钛合金板材的制备方法”,将多张钛合金板坯组焊,然后进行叠合轧制制备单重超过 10 t 的超大规格钛合金板材,制备的超大规格钛合金板材成分均匀、无偏析,解决了因受钛合金凝固时本身成分偏析的影响而无法制备出含易偏析元素的大规格铸锭,从而无法制备出含易偏析元素的大规格钛板的问题,同时还解决了因受熔炼设备的限制而无法制备超大规格钛合金板材的问题<sup>[38]</sup>;云南钛业股份有限公司公布了一种“钢钛共线 TC4 钛合金板坯一火轧制 TC4 钛合金宽厚板的方法”,该方法提出利用钢铁厂钢材轧机一火次轧制出 TC4 钛合金宽厚板,宽厚板的尺寸范围为:宽度 3500~4500 mm、厚度 30~60 mm、长度 6000~12 000 mm,不需要专门添置专用轧钛合金设备,在钢铁厂轧钢间隙穿插生产即可,既实现了高效率生产,又可以低成本一火成材<sup>[39]</sup>。

“十四五”期间,西北院依托国家相关课题,开发出适用于 700~1200 MPa 强度级别钛合金的大口径管材“一步法”连续穿轧制备技术,能够批量高效生产 DN100~DN400、长度 10~25 m、单重 0.5~1 t 的大口径薄壁钛合金管材,缩短管材加工周期 50%,降低生产成本 40% 以上。采用该技术制备了壁厚比 < 0.03、 $\Phi_{\text{外}}$  为 406 mm 的 TA24 中强合金大规格薄壁管材(图 6),开展了船用通海系统管路用材的小批量试制,目前正在进行考核验证。



图 6  $\Phi 406 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 5500 \text{ mm}$  TA24 合金管材  
Fig. 6 TA24 alloy pipe with dimensions of  $\Phi 406 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 5500 \text{ mm}$

西部金属材料股份有限公司公布了“一种超大规格钛合金管材的制备方法”,该方法将多个钛合金坯料单元依次进行轴向叠层、点焊、真空封焊和热等静压,得到超大规格钛合金坯料,再将坯料经过锻造、冲孔、挤压后获得超大规格成品钛合金管材,该方法可实现  $\Phi 600 \sim 1300 \text{ mm}$  超大规格钛合金管材的制备<sup>[40]</sup>。

### 3.2 低成本制备技术

海洋工程装备特别是舰船用钛材的另一个特点是用量大,材料及其构件的制备成本高会影响舰船的造价,这也是限制钛材在海洋工程领域应用的一大因素。导致钛材价格高的主要原因一个是原材料生产成本低,另一个是钛构件的加工流程长、难加工等。传统的海绵钛采用 Kroll 镁还原法,即用镁还原  $\text{TiCl}_4$  制备海绵钛,这种

工艺具有能耗高、生产周期长、需要大量金属镁作为还原剂等特点，导致海绵钛生产成本高。近些年关于海绵钛提取的新工艺也有大量的研究，包括剑桥法、电解法等，但均由于各种原因导致其工业化生产难度较大，各大海绵钛生产厂家仍然以 Kroll 法制备海绵钛<sup>[41]</sup>。而即使同样是采用 Kroll 法，与国外的全流程海绵钛生产工艺相比，国内普遍采用的是半流程生产工艺，生产成本更高<sup>[42]</sup>。近年来，各大海绵钛生产厂家也在积极兴建全流程生产线，这将有利于国内海绵钛生产成本的降低。另外，我国高端钛材产品要求采用金红石型钛精矿，而我国钛精矿对国外依赖度非常高，这也是影响高品质海绵钛成本的又一因素。针对这一问题，我国已经立项开展了采用国产钛矿制备高品质海绵钛的工程化应用研究工作，该项目的完成将有望提高我国海绵钛的品质并降低其成本。

除了从钛的冶金过程方面降低成本外，还有3个途径可以降低钛材的价格，第一种是在合金成分里面添加廉价合金元素，或是用廉价的元素替换昂贵的元素，比如采用 Fe 元素代替 TC4 里面的 V 元素等。西北院早期采用 Fe-Mo 中间合金代替 TC4 里面的 V 元素而设计了 Ti8LC 和 Ti12LC 合金，近期新研发了 Ti-6432、Ti6411 等低成本钛合金<sup>[43, 44]</sup>；南京工业大学通过添加 Fe, B 等元素开发出了 Ti-2Fe-0.1B、Ti-3Al-3.5Fe-0.1B 等低成本钛合金<sup>[45, 46]</sup>；宝鸡钛业股份有限公司开发了 Ti-3111、BTi-31、BTi-341、TC4LCA 等多个低成本钛合金牌号<sup>[47, 48]</sup>。第二种方法是通过缩短钛材制备流程来降低成本，比如采用 EB 制备扁锭再直接轧制成板材，省略了传统的采用 VAR 熔炼圆铸锭再锻造成板坯的工序；采用热连轧制备管材，缩短了管材的制备流程并减少了繁多的中间工序所造成的损耗，从而降低管材的制造成本等。第三种方法是通过利用回收料来降低原材料的成本，采用 EB 熔炼或 EB+VAR 混合熔炼的方式来实现对残废料的回

收<sup>[49]</sup>。大量实践表明，通过添加廉价合金元素来降低钛材构件成本的效果有限，因此近年来研究的重点聚焦于通过添加返回料和缩短加工流程来达到降低成本的目的。

宝鸡钛业股份有限公司在 EB 炉熔炼和添加返回料熔炼方面的研究起步较早，在单次 EB 熔炼 TC4、TA17 钛合金扁锭时，块状返回料添加比例达 70%~80%，铸锭成分可达标准要求。在 EB+VAR 熔炼方面也积累了大量的工业生产和实验数据<sup>[47]</sup>。云南钛业股份有限公司采用 EB 单次熔炼纯钛铸坯无锻造直接轧制成卷带，与传统的钛卷带制造技术相比，取消了锻造工序，生产成本降低了 20%左右；采用 VAR+EB 双联法熔铸 TC4 钛合金，其熔炼成本与两次 VAR 熔炼相比，成本降低了 10%左右<sup>[50]</sup>；采用 VAR+EB 工艺获得 TA31 (Ti80) 钛合金圆形铸锭，通过铸坯直接斜轧穿孔制备出了  $\Phi 538 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$  大口径无缝管，管材经过  $900 \text{ }^\circ\text{C}/1 \text{ h}$  /空冷退火处理后，抗拉强度为 892 MPa，屈服强度为 825 MPa，延伸率为 11%，性能达到了传统锻坯工艺制管水平。铸坯直轧工艺省掉了多火次锻造及中间修磨工序，制坯周期缩短，原料到管坯的成材率提高约 10%，加工成本降低约 30%<sup>[51]</sup>。

西北院依托国家预研项目，开展了海水管路用钛合金低成本铸锭制备技术研究工作，采用返回料+EB+VAR 的方法制备出了低成本的 Ti75 合金铸锭，对铸锭横截面采用 9 点分析法进行成分均匀性分析，结果表明铸锭成分均匀性良好，如图 7 所示；依托国家重点研发计划项目，开展了基于大量返回料利用的低成本钛合金材料设计及高效短流程技术开发，开发的 Ti6411 和 Ti-6432 低成本钛合金返回料利用率超过 95%，深入研究了这两种合金的强韧化机理及腐蚀行为，获得的双态组织 Ti-6432 合金棒材具有良好的强韧性匹配，在抗拉强度 1245 MPa 时冲击功可达 34 J<sup>[43]</sup>。项目组通过产业化高效短流程生产试制的 Ti6411 合金超宽幅中厚板具有良好的强韧性匹配，屈服强度大于

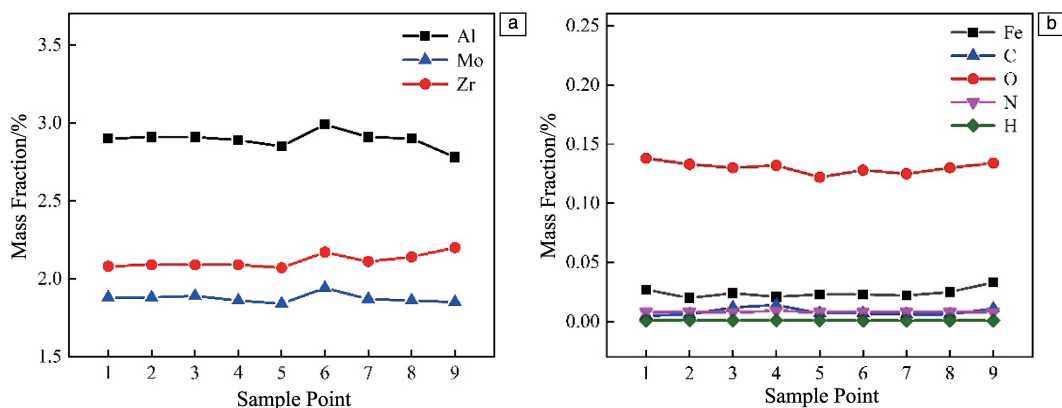


图7 添加返回料的 Ti75 合金铸锭成分均匀性：(a) 合金中的主元素，(b) 合金中的杂质元素

Fig. 7 The uniformity of composition of Ti75 alloy ingots with returned materials added: (a) the main elements, (b) impurity elements

930 MPa, 延伸率大于 10%, 断裂韧性大于  $80 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{-2}$ , 应力腐蚀断裂韧性大于  $60 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

### 3.3 能源装备用钛合金无缝管制备技术

随着能源开发向极地和海洋拓展, 钛合金油井管的优势越来越明显, 成为高温、高压、强腐蚀等苛刻环境钻采用管材的首选材料。国外针对钛合金油井管的制备技术较为成熟, 采用热挤压、热轧、冷轧等工艺制备无缝管材均已实现工业化生产。根据我国 SY/T 6896.3—2016《石油天然气工业特种管材技术规范 第 3 部分: 钛合金油管》中对钛合金油管的制造工艺要求, 钛合金油井管均是无缝管, 其生产工艺主要有热挤压+定(减)径(简称热挤压)、热挤压/斜轧穿孔+冷轧(简称冷轧)、斜轧穿孔+斜轧轧管/连轧轧管+定(减)径(简称热轧)<sup>[52]</sup>。热挤压工艺适合制备直径较小、长度短的管材, 大规格高强钛合金无缝管材对挤压设备能力要求较高, 大型挤压机可实现  $(\alpha+\beta)$  相变点以下温度挤压管材, 在管材组织性能调控方面具有优势, 但挤压管表面质量较差, 再加上挤压过程需要铜包套, 制备工序复杂、流程长、成本高; 冷轧生产工艺制备的管材表面质量好、尺寸精度高, 最大的缺点是由于钛合金冷成型差、易开裂、每道次轧制变形量小、需要多次轧制和中间退火处理, 导致加工周期长、能耗高、成材率低<sup>[27]</sup>; 热轧方式是目前高强钛合金无缝管制备采用较多的工艺, 具有流程短、效率高等特点, 但因斜轧穿孔多在  $(\alpha+\beta)$  相变点以上温度进行, 使得管坯的晶粒尺寸粗大, 通过后续轧制及定径实现显微组织的细小均匀控制较为困难, 因此全流程调控管材的组织性能是该工艺的关键。

国内宝鸡钛业股份有限公司、西北院、宝钢集团有限公司、天津钢管集团股份有限公司、七二五所、忠世高新材料股份有限公司等均在钛合金无缝管制备方面开展了大量的研究工作。宝鸡钛业股份有限公司研制生产的油气开采用 TC4S 合金高性能挤压管完全满足 API5CT 中 P110 钢的性能指标, 已成功交付并使用<sup>[53]</sup>。依托国家重点研发计划课题, 采用“挤压+温轧”和“挤压+机加”

两种加工工艺试制了 TC4 钛合金无缝管材, 从整体力学性能上比较, “挤压+温轧”工艺制备的 TC4 钛合金无缝管材更为优异; 但“挤压+温轧”工艺在实际生产过程中稳定性较低, 过程控制难点多, 加工难度较大。“挤压+机加”造成的材料损失较大, 材料成本较高, 生产同样长度的成品管材需要较长的挤压锭坯<sup>[54]</sup>。

西北院、天津钢管集团股份有限公司、西北工业大学等单位在国家重点研发计划项目的支持下, 利用天津钢管集团股份有限公司的三辊连轧机, 开展了高强韧 Ti90 合金无缝管材的研制工作。采用数值模拟软件, 对钛合金在斜轧穿孔、轧制、张力减径过程中的金属流行为、温度场、应力应变场分布等进行了模拟仿真, 图 8 为 Ti90 合金斜轧穿孔数值仿真采用的几何模型和坯料模型, 图 9 为斜轧穿孔过程中不同阶段的应变分布特征。通过对斜轧穿孔—轧制一定径全流程数值模拟, 获得的管材尺寸及外形特征等模拟结果与实际管材张力减径后的头尾部外形特征高度吻合, 有效地指导了热连轧工艺参数调控。采用  $\Phi 210 \text{ mm}$  Ti90 合金棒坯, 通过热连轧成功制备出单支长度超过 30 m 的超长高强韧 Ti90 钛合金无缝管材, 见图 10, 首次实现了 900 MPa 级高强韧耐蚀钛合金油管的工业化制备。管材经过双重退火热处理后的显微组织如图 11 所示, 组织由细小的等轴  $\alpha$  相、短棒状  $\alpha$  相及  $\beta$  转变组织构成, 管材室温屈服强度可达 925 MPa, 延伸率为 18%, 冲击功可达 58 J, 且在 720 h 硫化物应力开裂试验过程中未发生断裂, 通过了 NACE TM0177-2016 A 法试验, 达到了 130 Ksi 强度级别的力学性能要求。

## 4 存在的问题

(1) 缺乏对深海环境应用的高强韧钛合金的深入研究, 对材料及构件在服役条件下的失效形式及机理尚不清楚, 仍需加大对适用于海洋苛刻环境的高耐蚀高强韧钛合金及增材制造用钛合金的研发。

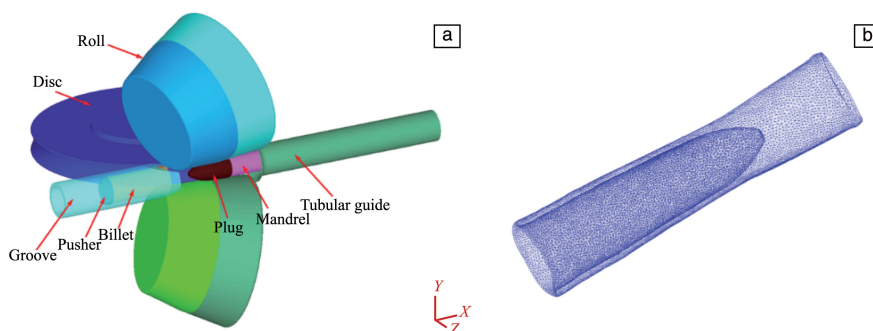


图 8 Ti90 合金斜轧穿孔数值仿真建模: (a) 几何模型, (b) 坯料模型

Fig. 8 Numerical simulation modeling of Ti90 alloy in rotary piercing process: (a) geometric model, (b) billet model

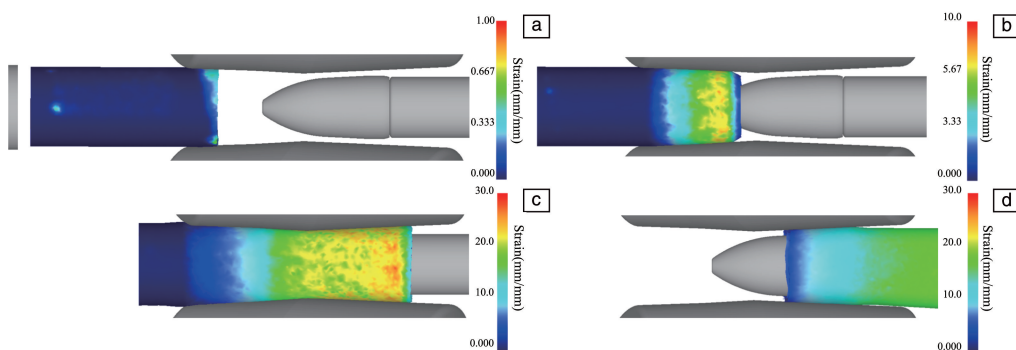


图 9 斜轧穿孔过程中 Ti90 管坯的外形变化与应变分布：(a) 初始咬入阶段，(b) 二次咬入阶段，(c) 稳定穿孔阶段，(d) 不稳定穿孔阶段

Fig. 9 Shape and strain distribution of the billet in rotary piercing process: (a) primary biting stage, (b) second biting stage, (c) stable piercing stage, (d) unstable piercing stage

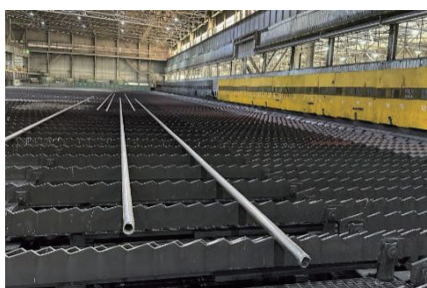


图 10 Ti90 高强韧钛合金无缝管

Fig. 10 Seamless tube made of high-strength and tough Ti90 alloy

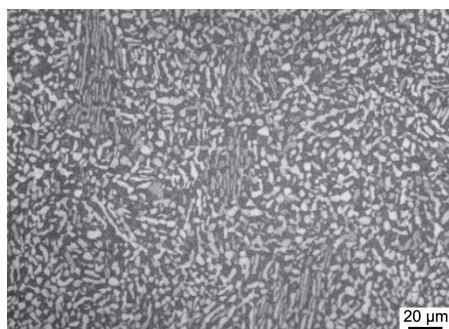


图 11 Ti90 合金无缝管组织形貌

Fig. 11 Microstructure of Ti90 alloy seamless tube

(2) 添加返回料是降低大规格钛合金构件生产成本的有效途径，但目前针对该类产品的评价标准缺失，有待积累更多的数据，形成低成本钛合金大规格构件的评价方法。

(3) 目前超大规格钛构件制备受限于设备能力，采用钢厂设备不能满足钛合金的变形工艺需求，钛合金无缝管材制备受管坯尺寸、管材规格和轧制孔型的限制，对轧制过程中变形速率、变形量等无法有效调控，使得钛材的性能潜力不能充分发挥，对成品质量的控制难度大，并且试制机会少、试错成本高，导致研制成本高，

技术突破周期长。

(4) 与舰船用钛材配套的相关技术研发落后，特别是大型结构件的焊接技术、残余应力控制技术、表面处理技术等，还需加大研发力度。

(5) 对舰船及能源装备用钛合金材料的合金成分-加工工艺-组织-性能之间的定量关系研究不足。

(6) 舰船及能源装备用钛合金大规格板材、管材等的探伤、残余应力等检测技术需要进一步提升。

## 5 结 语

近年来我国在舰船与能源装备用钛方面从材料到工程应用均开展了较多的研制工作，国家也以各种形式立项给予支持，研究人员在舰船及能源开采用钛合金成分设计、大规格构件制备、无缝管材制备等各个方面进行技术攻关，取得了显著的成果。钛合金作为“海洋金属”，其宽幅化、大单重化制备技术的突破，标志着我国已打破深海装备材料“卡脖子”困局，为万米级载人潜器、海底空间站等重大工程奠定了基础。热连轧具有效率高、流程短等特点，是发展潜力较大的无缝管制备技术，但目前借用钢管生产线设备不能满足钛合金的变形设置要求，而是材料去迁就设备，导致不能充分发挥钛材的性能潜力，若能针对钛材特点配置专用设备会获得更高质量的钛无缝管材。随着海绵钛生产成本的降低及返回料添加技术的突破，再加上工程应用方面的经验积累，钛材成本将会大幅降低，后续研究需关注低成本钛合金在能源开采装备中的规模化应用，通过短流程熔炼-近净成形技术降低全生命周期碳排放，将更加有利于钛材在海洋工程领域的推广应用。因此，亟需加大开展与舰船及能源装备用钛材应用相匹配的配套技术的研发，从整体上提升钛材应用的配套技术能力，也期望国内各科研院所及应用单位共同努力，加快开展能源开采装备

用钛合金无缝管材的应用评价工作,形成能源装备用钛无缝管材的生产体系,从而推动钛材在海洋工程领域的进一步应用。

### 参考文献 References

- [1] LEYENS C, PETERS M. Titanium and Titanium alloys[M]. Weinheim: Wiley-VCH, 2003.
- [2] 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.  
ZHANG X Y, ZHAO Y Q, BAI C G. Titanium Alloys and Their Applications[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [3] 赵永庆. 中国材料进展[J], 2014, 33(7): 398-404.  
ZHAO Y Q. Materials China[J], 2014, 33(7): 398-404.
- [4] 张爱锋, 李艳青, 徐强, 等. 船舶[J], 2024, 213(6): 81-91.  
ZHANG A F, LI Y Q, XU Q, *et al.* Ship and Boat[J], 2024, 213(6): 81-91.
- [5] 蒋鹏, 王启, 张斌斌, 等. 中国工程科学[J], 2019, 21(6): 95-101.  
JIANG P, WANG Q, ZHANG B B, *et al.* Strategic Study of CAE[J], 2019, 21(6): 95-101.
- [6] 林成, 赵永庆, 贾蔚菊, 等. 基于余氏理论的近 $\alpha$ 钛合金性能优化与成分逆向设计方法: CN112528465B[P]. 2023-06-13.  
LIN C, ZHAO Y Q, JIA W J, *et al.* Optimization of Properties and Reverse Design Method of Composition for Near- $\alpha$  Titanium Alloy Based on Yu's Theory: CN112528465B[P]. 2023-06-13.
- [7] HUANG S, ZHAO Q, LIN C, *et al.* Materials Science & Engineering: A[J], 2021, 818(22): 141394.
- [8] HUANG S, ZHAO Q, WU C, *et al.* Journal of Alloys and Compounds [J], 2021, 876(25): 160085.
- [9] HUANG S, ZHAO Q, LIN C, *et al.* Materials Science and Engineering: A[J], 2021, 809(30): 140958.
- [10] HUANG S, ZHAO Q, ZHAO Y, *et al.* Journal of Materials Science & Technology[J], 2021, 79(20): 147-164.
- [11] 张颖, 赖长亮, 和卫平, 等. 舰船科学技术[J], 2022, 44(5): 1-6.  
ZHANG Y, LAI C L, HE W P, *et al.* Ship Science and Technology [J], 2022, 44(5): 1-6.
- [12] 王华, 赵坦, 陈妍. 材料开发与应用[J], 2023, 38(3): 88-95.  
WANG H, ZHAO T, CHEN Y. Development and Application of Materials[J], 2023, 38(3): 88-95.
- [13] 杨锐, 马英杰. 前瞻科技[J], 2022, 1(2): 145-156.  
YANG R, MA Y J. Science and Technology Foresight[J], 2022, 1(2): 145-156.
- [14] 王祝堂. 轻金属[J], 2021(10): 18.  
WANG Z T. Light Metal[J], 2021(10): 18.
- [15] 海敏娜, 王永梅, 贾栓孝, 等. 稀有金属[J], 2022, 47(3): 365-372.  
HAI M N, WANG Y M, JIA S X, *et al.* Chinese Journal of Rare Metals[J], 2022, 47(3): 365-372.
- [16] 赵永庆, 葛鹏, 辛社伟. 中国材料进展[J], 2020, 39(7/8): 527-534.  
ZHAO Y Q, GE P, XIN S W. Materials China[J], 2020, 39(7/8): 527-534.
- [17] 孙花梅, 刘伟, 戚运连, 等. 钛工业进展[J], 2022, 39(1): 6-11.  
SUN H M, LIU W, QI Y L, *et al.* Titanium Industry Progress[J], 2022, 39(1): 6-11.
- [18] 王晋忠, 柴斐, 汪卓然, 等. 电焊机[J], 2025, 55(1): 19-27.  
WANG J Z, CHAI F, WANG Z R, *et al.* Electric Welding Machine [J], 2025, 55(1): 19-27.
- [19] 赵永庆, 马朝利, 常辉, 等. 中国材料进展[J], 2016, 35(12): 914-918.  
ZHAO Y Q, MA C L, CHANG H, *et al.* Materials China[J], 2016, 35(12): 914-918.
- [20] 李俊宏. 中国机械[J], 2024(2): 65-69.  
LI J H. Machine China[J], 2024(2): 65-69.
- [21] 中国石油集团石油管工程技术研究院. 钢管[J], 2020, 49(4): 79.  
CNPC Tubular Goods Research Institutes. Steel Pipe[J], 2020, 49(4): 79.
- [22] 孙建刚, 宋德军. 材料开发与应用[J], 2019, 34(6): 96-102.  
SUN J G, SONG D J. Development and Application of Materials[J], 2019, 34(6): 96-102.
- [23] 周晓锋, 孙宇, 张传友, 等. 钢管[J], 2019, 48(1): 20-23.  
ZHOU X F, SUN Y, ZHANG C Y, *et al.* Steel Pipe[J], 2019, 48(1): 20-23.
- [24] 要思禹, 于洋, 刘强, 等. 稀有金属[J], 2022, 48(11): 1574-1581.  
YAO S Y, YU Y, LIU Q, *et al.* Chinese Journal of Rare Metals[J], 2022, 48(11): 1574-1581.
- [25] 周珍妮, 艾宇浩, 刘会群, 等. 石油管材与仪器[J], 2023, 9(4): 27-31.  
ZHOU Z N, AI Y H, LIU H Q, *et al.* Petroleum Tubular Goods & Instruments[J], 2023, 9(4): 27-31.
- [26] 文志刚, 李献军, 吴月茜, 等. 世界有色金属[J], 2018(3): 278-279.  
WENG Z G, LI X J, WU Y Q, *et al.* World Non-Ferrous Metals[J], 2018(3): 278-279.
- [27] 董恩涛, 余伟, 史佳新, 等. 钢管[J], 2021, 50(1): 13-17.  
DONG E T, YU W, SHI J X, *et al.* Steel Pipe[J], 2021, 50(1): 13-17.
- [28] 侯智敏, 赵永庆, 赵彬, 等. 一种海洋工程用高强韧钛合金: CN107541615B[P]. 2019-02-15.  
HOU Z M, ZHAO Y Q, ZHAO B, *et al.* A High Strength and Toughness Titanium Alloy for Ocean: CN107541615B[P]. 2019-02-15.
- [29] 王可, 赵永庆, 贾蔚菊, 等. 稀有金属材料与工程[J], 2021, 50(2): 552-561.  
WANG K, ZHAO Y Q, JIA W J, *et al.* Rare Metal Materials and Engineering[J], 2021, 50(2): 552-561.
- [30] MAO C, JIA W, LI Q, *et al.* Materials Today Communications [J], 2025, 42: 111261.
- [31] 李思兰, 张思远, 李倩, 等. 石油管材与仪器[J], 2023, 9(4): 49-

53.  
LI S L, ZHANG S Y, LI Q, *et al.* Petroleum Tubular Goods & Instruments[J], 2023, 9(4): 49-53.
- [32] 杜玉俊, 刘向宏, 李金山, 等. 稀有金属材料与工程[J], 2020, 49(3): 883-889.  
DU Y J, LIU X H, LI J S, *et al.* Rare Metal Materials and Engineering[J], 2020, 49(3): 883-889.
- [33] 史莹莹, 刘钊, 陈峰, 等. 世界有色金属[J], 2018(12): 9-12.  
SHI Y Y, LIU Z, CHEN F, *et al.* World Non-Ferrous Metals[J], 2018(12): 9-12.
- [34] 尹春春, 陈峰, 乔璐, 等. 世界有色金属[J], 2023(5): 122-125.  
YIN C C, CHEN F, QIAO L, *et al.* World Non-Ferrous Metals[J], 2023(5): 122-125.
- [35] 杨健, 张开发, 曹江海, 等. 钛工业进展[J], 2023, 40(4): 1-5.  
YANG J, ZHANG K F, CAO J H, *et al.* Titanium Industry Progress[J], 2023, 40(4): 1-5.
- [36] 王黎阳, 屠孝斌, 杨亚明, 等. 锻造与冲压[J], 2024(17): 69-72.  
WANG L Y, TU X B, YANG Y M, *et al.* Forging & Metalforming[J], 2024(17): 69-72.
- [37] 屠孝斌, 段晓辉, 宋蕊池, 等. 锻造与冲压[J], 2023(19): 20-24.  
TU X B, DUAN X H, SONG R C, *et al.* Forging & Metalforming[J], 2023(19): 20-24.
- [38] 葛鹏, 王瑞琴, 刘宇, 等. 一种超大规格钛合金板材的制备方法: CN113441912B[P]. 2023-05-02.  
GE P, WANG R Q, LIU Y, *et al.* A Manufacturing Method for Extra-Large Titanium Alloy Plates: CN113441912B[P]. 2023-05-02.
- [39] 储双杰, 肖桂林, 刘昆, 等. 钢钛共线 TC4 钛合金板坯一火轧制 TC4 钛合金宽厚板的方法: CN117583401A[P]. 2024-02-23.  
CHU S J, XIAO G L, LIU K, *et al.* Single-Pass Rolling Method for TC4 Titanium Alloy Wide-Heavy Plates Using Co-Line Produced TC4 Slabs: CN117583401A[P]. 2024-02-23.
- [40] 葛鹏, 席锦会, 王瑞琴, 等. 一种超大规格钛合金管材的制备方法: CN113976658B[P]. 2024-06-25.  
GE P, XI J H, WANG R Q, *et al.* A Preparation Method for Ultra-Large-Scale Titanium Alloy Tubes: CN113976658B[P]. 2024-06-25.
- [41] 辛社伟, 刘向宏, 张思远, 等. 稀有金属材料与工程[J], 2023, 52(11): 3971-3980.  
XIN S W, LIU X H, ZHANG S Y, *et al.* Rare Metal Materials and Engineering[J], 2023, 52(11): 3971-3980.
- [42] 姜宝伟, 徐聪, 杜鑫, 等. 2023 年中国钛产业发展高峰论坛论文集 [C]. 宝鸡: 中国有色金属工业协会钛锆钎分会, 2023.  
JIANG B W, XU C, DU X, *et al.* Proceedings of the 2023 China Titanium Industry Development Summit Forum[C]. Baoji: China Non-ferrous Metals Industry Association Titanium Zirconium and Hafnium Branch, 2023.
- [43] WANG H, TU X, GUO P, *et al.* Journal of Materials Research and Technology[J], 2025, 35: 4412-4426.
- [44] QIAO Z, ZHAO Q, GUO P, *et al.* Materials & Design[J], 2024, 248: 113521.
- [45] 刘畅, 董月成, 方志刚, 等. 稀有金属材料与工程[J], 2020, 49(5): 1607-1613.  
LIU C, DONG Y C, FANG Z G, *et al.* Rare Metal Materials and Engineering[J], 2020, 49(5): 1607-1613.
- [46] WANG Y, JIN Y, GUO Y, *et al.* Journal of Materials Research and Technology[J], 2024, 31: 1853-1863.
- [47] 冯秋元, 佟学文, 王俭, 等. 材料导报[J], 2017, 31(5): 128-134.  
FENG Q Y, TONG X W, WANG J, *et al.* Materials Reports[J], 2017, 31(5): 128-134.
- [48] 王俭, 冯秋元, 雷挺, 等. 金属热处理[J], 2022, 47(11): 82-86.  
WANG J, FENG Q Y, LEI T, *et al.* Heat Treatment of Metals[J], 2022, 47(11): 82-86.
- [49] 赵秦阳, 陈永楠, 徐义库, 等. 中国有色金属学报[J], 2021, 31(11): 3127-3140.  
ZHAO Q Y, CHEN Y N, XU Y K, *et al.* The Chinese Journal of Nonferrous Metals[J], 2021, 31(11): 3127-3140.
- [50] 黄海广, 肖寒, 熊汉城, 等. 云南冶金[J], 2020, 49(6): 59-67.  
HUANG H G, XIAO H, XIONG H C, *et al.* Yunnan Metallurgy[J], 2020, 49(6): 59-67.
- [51] 张浩泽, 余堃, 钟海, 等. 兵器材料科学与工程[J], 2022, 45(3): 35-40.  
ZHANG H Z, YU K, ZHONG H, *et al.* Ordnance Material Science and Engineering[J], 2022, 45(3): 35-40.
- [52] 肖国章. 钢管[J], 2018, 47(2): 9-15.  
XIAO G Z, Steel Pipe[J], 2018, 47(2): 9-15.
- [53] 李献军, 王镐, 羊玉兰. 中国钛业[J], 2011(2): 21-24.  
LI X J, WANG H, YANG Y L. China's Titanium Industry[J], 2011(2): 21-24.
- [54] 谢林均, 凤伟中, 代春, 等. 世界有色金属[J], 2022(7): 1-3.  
XIE L J, FENG W Z, DAI C, *et al.* World Non-Ferrous Metals[J], 2022(7): 1-3.