DOI:10.3969/j.issn.1671-6795.2026.05.002

TIG 焊钛合金连续管对接接头组织与性能分析

王维亮[1,2],刘荣欣[1,2,3],何石磊[1,2],宋海辉[1,2],臧　伟[1,2,3]

(1.中国石油集团宝石管业有限公司,陕西 宝鸡 721008;2.中油国家石油天然气管材工程技术研究中心有限公司,陕西 西安 710018;3.陕西省高性能连续管重点实验室,陕西 宝鸡 721008)

摘　要:针对 TA18 钛合金连续管在油气开采严苛工况下的焊接服役需求,开展 Φ40 mm×3.5 mm 规格 TA18 钛合金连续管的手工 TIG 对接焊试验。通过系统检测接头的强度、塑韧性、微观组织、硬度、疲劳寿命及耐蚀性等关键性能,全面评估其综合服役潜力。结果表明:接头母材为等轴组织,热影响区呈网篮组织,焊缝为粗大魏氏体组织,三者硬度依次略有增大但整体波动较小;接头力学性能优异,抗拉强度达 689 MPa、屈服强度 592.5 MPa、伸长率 19.9%,爆破压力平均为 132.9 MPa,弯曲及压扁试验无裂纹产生,塑韧性表现优良;接头疲劳寿命为 357 次,达到母管寿命的 50%,远超手工焊接接头疲劳寿命不低于母管 35% 的行业指标要求,断口位置位于母材区域;接头耐蚀性良好,均匀腐蚀速率仅为 0.000 7 mm/a,低于 0.001 mm/a 的工业标准阈值,可满足高含 H_2S/CO_2 的高温高压腐蚀环境长期服役要求。

关键词:钛合金;连续管;对接接头;组织;强度;疲劳;腐蚀

中图分类号:TG146.23　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-6795(2026)05-0010-04

在石油管材装备领域,由于油气开采面临的环境越来越恶劣,特别是高含 CO_2、H_2S 和 Cl^- 腐蚀介质油气田相继出现,现有的碳钢、不锈钢管材已不能满足其指标要求,在此背景下,对高端石油管材的需求越发迫切[1]。

钛及钛合金凭借优异的比强度、耐腐蚀性和低温韧性,已成为石油天然气钻采装备中管材、井口装置等关键部件的首选材料[2]。其中,连续管作为一种柔性管材,在钻井和压裂酸化等作业中发挥着重要作用[3]。钛合金连续管具有高强度和高抗腐蚀性,适合苛刻油气环境[4]。然而,连续管在服役过程中需承受复杂工况(如交变载荷、腐蚀介质及高温高压等),其焊接接头的质量直接决定了装备的安全性与可靠性[5-7]。此外,受运输和服役环境制约,有时需要通过环焊进行连接。目前国内外对于钛合金焊接主要方法包括钨极惰性气体保护焊(TIG)、摩擦焊(FW)、激光焊接(LBW)、等离子焊、电子束焊接(EBW)等。TIG 焊因热源集中、焊接变形小、接头质量稳定等优势,被广泛应用于钛合金精密构件的焊接[8]。

本文选用牌号为 ASTM B338 Gr9 为研究对象,采用 TIG 焊进行对接焊接,通过设计焊接关键参数,系统分析接头的宏观成形、微观组织特征,并结合力学、疲劳、爆破等性能测试,说明该焊接工艺参数的适用性,可为下一步优化其工艺参数奠定坚实基础,以期为钛合金连续管现场焊接提供技术支撑。

1　试验材料与工艺

1.1　试验材料及设备

试验材料选用牌号为 ASTM B338 Gr9,规格为 Φ40 mm×3.5 mm 钛合金连续管,填充材料是牌号为 ASTM E2371-13 Gr9 直径为 2.0 mm 焊丝,化学成分见表 1。保护气体是纯度不低于 99.99% 氩气。采用钨极氩弧焊焊接设备,焊机为唐山松下 YC-400TX4,焊缝背面保护装置和拖罩为自主研发的设备。

1.2　焊接工艺

钛合金表面质量直接影响焊接接头力学性能,因此焊前需对管材及焊丝表面进行严格清理以去除杂质。首先,用油污清洗剂处理管材坡口 50 mm 内外及焊丝表面油污;然后,采用不锈钢丝刷清除坡口及焊丝的氧化皮,最后用丙酮擦洗并确保其干燥。

收稿日期:2026-4-17

基金项目:连续完井管柱关键技术(一期)(25BSGYSG001)

作者简介:王维亮(1978-),女,硕士,高级工程师,主要从事油气管材新产品开发相关工作。

通讯作者:刘荣欣(1988-),博士,主要从事连续管新产品研发工作。

表 1　钛管及焊丝的化学成分(质量分数,%)

项目	Ti	Al	V	Fe	C	O	N	H
管材	余量	2.99	2.61	0.034	0.006	0.045	<0.003	0.0009
焊丝	余量	2.80	2.70	0.060	0.010	0.080	0.010	0.0010

常温下钛材表面氧化膜可维持其稳定性与耐蚀性,但焊接时液态熔滴及熔池金属易吸收氢、氧、氮,且吸杂能力随温度升高而增强(250 ℃始吸氢、400 ℃始吸氧、600 ℃始吸氮),导致接头脆化。为此,焊接时需要通过背面保护装置、拖罩及焊枪协同输送保护气体,实现焊缝及热影响区的全范围保护。

本次试验采用全位置手工 TIG 焊,接头为 V 形坡口(α 角度 60°、钝边 0 ~ 0.05 mm、组对间隙 2 ~ 3 mm),对接接头坡口示意图如图 1 所示。由于钛合金具有熔点高、热容大、导热差等特点,所以在焊接时易形成温度较高且尺寸较大的熔池,该区晶粒粗大,进而导致其接头韧性降低。为解决上述问题,本试验采用小线能量多层焊工艺,即选用较小焊接电流与较快焊接速度来细化晶粒,同时,为防止表面氧化,第一层焊后持续充氩至温度低于 100 ℃,清理焊缝后再焊下一层,具体工艺参数见表 2。

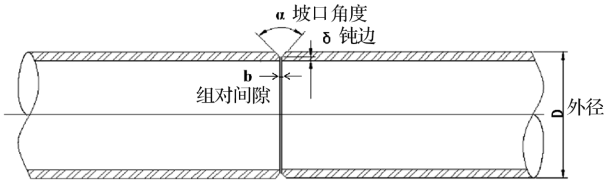


图 1　对接接头坡口示意图

表 2　钛合金连续管环焊工艺参数

焊接层次	电流/A	电压/V	焊接速度/(mm · min^{-1})	层间温度/℃	保护气体/(L/min)		
					焊枪	背保护	拖罩
打底焊	60~70	7~8	15~20	<60	20	25	20
填充焊	70~80	8~9	25~30				

钛合金连续管焊接接头宏观形貌如图 2 所示,可以看出,焊接接头冶金结合良好,无明显的气孔、裂纹、偏析缩尾、夹杂及其他缺陷。

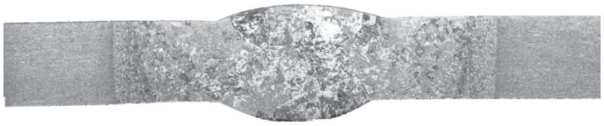


图 2　钛合金连续管焊接接头宏观形貌

2　结果与讨论

2.1　微观组织与硬度

采用 Olympus GX71 型光学显微镜进行焊接接头金相组织分析。图 3 为母材-热影响区(HAZ)-对接焊缝局部放大形貌图。从图 3 可以看出,母材,热影响区和焊缝组织类型存在较大差异,母材组织为等轴组织,热影响区为网篮组织,焊缝为粗大的魏氏体组织,这主要与焊接的热量分布有关,焊缝热量最高,热影响区次之,母材最低,焊缝晶粒尺寸最大,热影响区次之,母材晶粒最为细小。

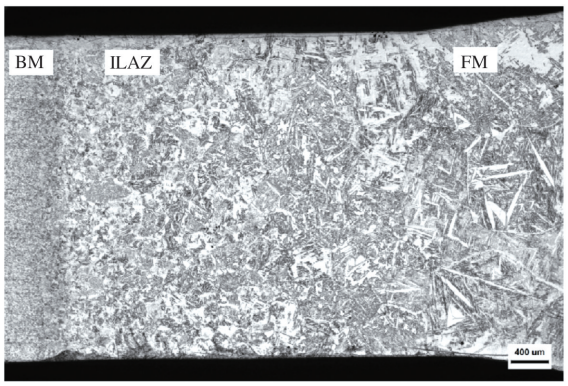
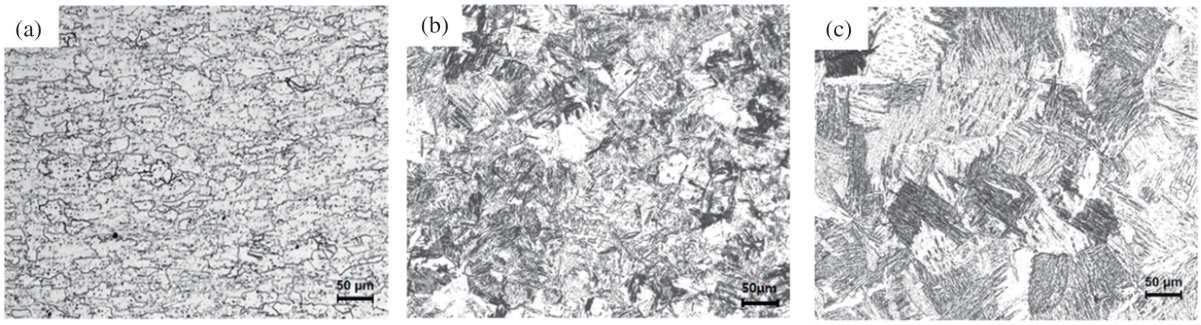


图 3　母材-热影响区-焊缝局部形貌(25×)

为明确 TA18 钛合金焊接接头母材、热影响区及焊缝的组织结构与晶粒尺寸,对其微观形貌进行观察分析,由图 4 可以看出,母材为等轴 α 组织,晶粒尺寸约 20 μm。热影响区呈网篮状组织,含有较为粗大次生 α 板条及块状 α 相,其晶粒尺寸随距热源距离增加呈递减趋势。焊缝区组织较热影响区粗大,为魏氏组织,且晶界间具有 α 板条状组织,主要原因为钛合金导热性差,焊缝处能量高、散热慢导致晶粒生长粗大。



(a) 母材;(b) HAZ;(c) 焊缝微观组织形貌

图 4 焊接接头母材、热影响区及焊缝微观组织(200×)

对钛合金连续管对接焊焊缝、HAZ 和母材的截面微观硬度进行测试,结果显示,母材平均维氏硬度值为 228,热影响区平均维氏硬度值为 232,焊缝平均维氏硬度值为 238,与母材硬度相比,焊缝、HAZ 的硬度有所增加。这主要与焊缝组织为粗大魏氏组织有关,且晶界处有 α 板条状组织析出。

2.2 管材强度和塑韧性

为评价钛合金连续管及焊接接头的拉伸性能,本研究采用 ZIWCK 电子万能试验机,依据 GB/T 228.1-2021《金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》标准,开展整管拉伸试验,试验环境设定为室温,核心测试指标包括管材及接头的屈服强度、抗拉强度与断后伸长率,具体试验结果为,钛合金连续管母管的抗拉强度为 707.5 MPa、屈服强度 607 MPa、断后伸长率 19.4%;焊接接头的抗拉强度 689 MPa、屈服强度 592.5 MPa、断后伸长率 19.9%。对比可见,焊接接头与母管的强韧性水平基本一致,这表明焊接接头在承重、提拉承载能力上与母材相当,同时具备良好的延伸性能,满足使用过程中的变形需求。

为进一步验证焊接接头的塑性性能,采用 WE-30B 液压万能试验机,分别依据 GB/T 232-2010《金属材料 弯曲试验方法》及 GB/T 246-2017《金属材料管 压扁试验方法》标准,开展焊接接头的弯曲试验与压扁试验。弯曲试验采用 10 mm 弯模半径,将试样进行 180°弯曲,结果见表 3 所示。

表 3 钛合金连续管焊接接头的弯曲和压扁试验结果

弯曲面	弯曲角/°	弯曲结果	压板间距/mm	压扁结果
正弯	90	无裂纹	26	无裂纹
反弯	90	无裂纹	26	无裂纹
正弯	90	无裂纹		
反弯	90	无裂纹		

弯曲试验后,焊缝及母材区域均未出现裂纹、开裂等缺陷。压扁试验中,将焊接接头试样压缩至两板间距 26 mm(即管材外径的 2/3)时,焊缝及母材仍保持完好,无裂纹或开裂现象产生。该结果表明,钛合金连续管焊接接头与母材均具备优良的塑韧性。

2.3 低周疲劳性能

试验以规格为 Φ40 mm×3.5 mm 的 TA18 钛合金连续管为研究对象,开展实物弯曲疲劳试验。试验设定内压为 34.47 MPa,弯曲半径采用 1 219 mm——该参数为对应规格连续管作业车卷筒的最小内径,也是连续管在实际作业中承受的最严苛弯曲工况(即最小弯曲半径),以此模拟真实服役条件下的受力状态。试验采用 3 组平行试样消除偶然误差,最终获取的疲劳寿命数据,焊接接头的平均疲劳寿命为 357 次;母管的平均疲劳寿命为 708 次。在相同规格、相同内压及相同弯曲半径试验条件下,焊接接头的平均疲劳寿命约为母管的 50%,在规定范围之内。据国外相关工程标准与研究资料,对于同类型连续管,手工焊焊接接头的疲劳寿命只要达到母管的 30%,即可满足工程应用的性能要求。本研究中钛合金连续管手工对接接头的疲劳寿命达标率已远超该阈值,表明其具备优异的抗疲劳性能,完全满足实际作业需求。

2.4 爆破性能

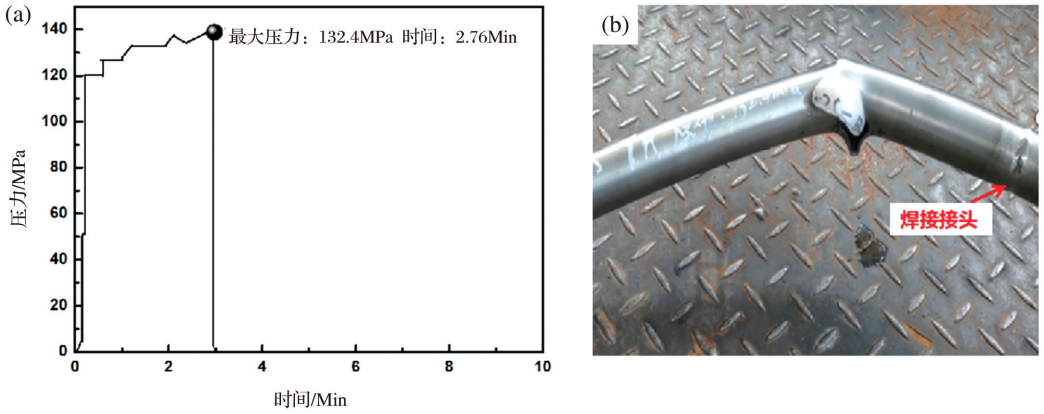
试验采用 SW-CPT-300 管材挤毁试验系统,依据 GB/T 241《金属材料 管 液压试验方法》标准,开展抗内压爆破试验。管长 2 500 mm,焊缝位于中间,管端封堵,加压介质为水,结果见表 4。

表 4 抗内压爆破试验结果

试验温度/℃	封堵方式	加压介质	爆破压力值/MPa	失效位置
室温	两端封堵	水	132.4	母材
室温	两端封堵	水	129.8	母材
室温	两端封堵	水	136.6	母材

图 5 为钛合金连续管的爆破试验打压曲线和爆破

后实物形貌。结果表明,钛合金连续管对接接头的平均爆破压力值为 132.9 MPa,且从图 5(b)爆破后管材形貌可以看出,失效位置远离对接焊缝,表明该对接接头强度高,稳定性良好,具备承受较高内压的能力,抗内压性能优异。



(a)爆破试验曲线,(b)爆破后形貌

图 5　钛合金连续管爆破试验曲线和爆破后形貌

2.5　高温高压腐蚀试验

依据 ASTM G111-21a《高温或高压环境中或高温高压环境中的腐蚀试验》试验标准,采用 MRIE-Z3964 设备,对钛合金连续管母材和对接焊缝开展高温高压釜失重模拟实验,试样尺寸为 50 mm×10 mm×3 mm,腐蚀环境条件如表 5 所示,根据试样的质量损失计算出平均腐蚀速率。试验后按照式(1)计算试样腐蚀速率。钛合金连续管对接焊缝均匀腐蚀速率为 0.000 7 mm/a,母材均匀腐蚀速率为 0.000 3 mm/a,连续管焊缝和母材均匀腐蚀速率均<0.001 mm/a。由此可知,带焊接接头的钛合金连续管满足在高含 H_2S 和 CO_2 共存的高温高压环境下长期作业。

$$r_c=\frac{8.76\times10^4\times(m-m_1)}{S\times t\times\rho} \tag{1}$$

式中:r_c 为均匀腐蚀速率,mm/a;m 为试验前的试样质量,g;m_1 为试验后的试样质量,g;S 为试样表面积,cm^2;ρ 为试样材料的密度,g/cm^3;t 为试验时间,h。

表 5　高温高压模拟工况腐蚀条件

样品名称	试验温度/℃	试验压力/MPa	CO_2 分压/MPa	H_2S 分压/MPa	时间/h
母材	60	12	0.78	5.5	168
焊接接头	60	12	0.78	5.5	168

3　结论

(1)钛合金连续管焊接接头的母材、热影响区及焊缝组织存在显著差异,母材为等轴组织,热影响区为网篮组织,焊缝则为粗大魏氏体组织。这一现象主要由焊接过程中的热量分布梯度导致,其中焊缝区域热量最高,热影响区次之,母材最低,热量差异直接影响了各区域的晶粒生长与相变行为。

(2)焊接接头具有较为优异的力学及耐蚀性能。焊接接头平均抗拉强度达 689 MPa,屈服强度 592.5 MPa,伸长率 19.9%;硬度呈现母材(228)<热影响区(232)<焊缝(238)的规律,且样品经弯曲和压扁试验后,其表面均未出现裂纹,表明该焊接接头具有较优的塑韧性与抗弯曲变形能力。同时,该焊接接头具有较优的耐疲劳性能,平均疲劳寿命达 357 次(为母管的 50%,远超手工焊 35%的要求),且断口位于母材(远离焊缝)。高温高压腐蚀试验中,均匀腐蚀速率仅 0.000 7 mm/a(小于标准要求的 0.001 mm/a),适合在高含 H_2S 和 CO_2 的服役环境中应用。

(3)针对小口径钛合金连续管,需通过控制焊接热输入优化焊接工艺,即采用较小的热输入可有效减小焊缝晶粒尺寸,避免魏氏组织形成,从而提升焊接接头的综合力学性能及耐腐蚀性,为后续工程应用中的可靠性提供保障。

参考文献

[1] LI X G,ZHANG D W,LIU Z Y,et al. Materials science: Share corrosion data [J].Nature,2015,527:441.

[2] 郭鲤,何伟霞,周鹏,等.我国钛及钛合金产品的研究现状及发展前景[J].热加工工艺,2020,49(22):22-28.

[3] 刘寿军,李根生.我国连续管技术面临的挑战和发展建议[J].石油机械,2013,41(11):1-5.

[4] 付亚荣,谷胜群,宋惠梅,等.钛合金管材在高含硫天然气开发中的应用现状[J].石油机械,2018,46(3):116-124.

(下转第 25 页)

Influence of Annealing Temperature on Tensile Performance and Fracture Behavior of Large-Dimension TA15 Bars

Ning Bo, Wu Junyu, Zhang Xin, Zhang Yao, Chen Guizeng

(Northwest Institute For Non-Ferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

Abstract: Conventional annealing heat treatment at temperatures ranging from 730 ℃ to 840 ℃ was performed on Φ280 mm TA15 titanium alloy bars. Metallurgical microscope, scanning electron microscope (SEM) and electronic universal testing machine were adopted to investigate the microstructure, room-temperature mechanical properties, high-temperature mechanical properties, fracture morphology and longitudinal-section microstructure near the fracture at the half-radius position of the TA15 bars. The results indicate that as the annealing temperature rises from 730 ℃ to 840 ℃, both the room-temperature and high-temperature strengths of the TA15 bars increase gradually. The room-temperature plasticity barely changes, while the high-temperature plasticity decreases slightly. This phenomenon can be attributed to annealing carried out in the (α+β) two-phase region: elevated annealing temperature raises the fraction of transformed β microstructure. When the annealing temperature exceeds 800 ℃, secondary α phases precipitate within the transformed β matrix. The increased volume fraction of transformed β microstructure together with the strengthening effect induced by secondary α phases contributes to the improvement in both room-temperature and high-temperature tensile strengths of the TA15 alloy bars. During room-temperature tensile deformation, cavities and microcracks preferentially initiate at the interfaces between transformed β microstructure and primary α phase. In contrast, cavities and microcracks nucleate both at α/β phase boundaries and inside the transformed β microstructure under high-temperature tensile loading.

Keywords: TA15 alloy; ambient temperature properties; high temperature properties; phase interface

(上接第 13 页)

[5] 何小明,刘洪杰,谢道原,等.高温高压硫酸环境中钛及钛合金腐蚀特性研究[J].钛工业进展,2025,42(6):17-21.

[6] 毕宗岳,余晗,鲜林云,等.连续管技术研究现状与发展趋势[J].焊管,2023,46(07):1-13.

[7] BRAHIM M K, HADJADJ A, SAAD A A, et al. Innovative Approach Integrating Machine Learning Models for Coiled Tubing Fatigue Modeling[J]. Applied Sciences, 2025, 15(6): 2899.

[8] 冯靖,樊立民,耿乃涛,等.高强钛合金 TIG 焊接工艺研究[J].钢铁钒钛,2021,42(6):158-16.

Analysis on Microstructure and Properties of Butt Joints of Titanium Alloy Coiled Tubing Fabricated by TIG Welding

Wang Weiliang[1,2], Liu Rongxin[1,2,3], He Shilei[1,2], Song Haihui[1,2], Zang Wei[1,2,3]

(1. CNPC Baoji Petroleum Pipe Industry Co., Ltd., Baoji 721008, China;

2. Chinese National Engineering Research Center for Petroleum and Natural Gas Tubular Goods Co., Ltd., Xi'an 710018, China;

3. Key Laboratory of High Performance Continuous Tube in Shaanxi Province, Baoji 721008, China.)

Abstract: To meet the service demands of TA18 titanium alloy coiled tubing welded joints under severe oil and gas working environments, manual TIG butt welding tests were performed on Φ40 mm × 3.5 mm TA18 coiled tubing. Systematic characterizations on mechanical properties, microstructure, fatigue performance and corrosion resistance were conducted to comprehensively assess its service performance. The results show that the base metal of the joint possesses an equiaxed microstructure, the heat-affected zone exhibits a basket-weave microstructure, and the weld zone consists of coarse Widmanstätten microstructure. The hardness values increase slightly in the above order with an overall small fluctuation. The welded joint displays excellent mechanical properties: the ultimate tensile strength reaches 689 MPa, the yield strength is 592.5 MPa, and the elongation is 19.9%, the average burst pressure is 132.9 MPa. No cracks are detected after bending and flattening tests, which demonstrates favorable plasticity and toughness. The fatigue life of the joint is 357 cycles, accounting for 50% of that of the base tube. This value far exceeds the industrial specification that the fatigue life of manually welded joints shall be no less than 35% of the base tube, and fracture occurs in the base metal region. In addition, the joint features satisfactory corrosion resistance, with a uniform corrosion rate of merely 0.0007 mm/a, lower than the industrial threshold of 0.001 mm/a. Consequently, the joint can serve for a long time under high-temperature and high-pressure corrosive environments rich in H_2S and CO_2.

Keywords: titanium alloy; coiled tubing; butt joint; microstructure; strength; fatigue; corrosion