

TC4ELI钛合金TIG焊接头超声冲击后的性能研究

马小俊¹,王金杰¹,张得扬^{2,3},汪俊²,赵勇¹,王飞云¹,付娟¹

(1.江苏科技大学材料科学与工程学院,江苏镇江212000;2.中国船舶科学研究中心,江苏无锡214000;
3.船舶结构安全全国重点实验室,江苏无锡214000;)

摘要 为解决船用TC4ELI钛合金焊后残余应力较高的问题,对TC4ELI钛合金TIG焊接头进行超声冲击(UIT)处理,对比分析超声冲击处理前后接头的残余应力、力学性能和耐腐蚀性。结果表明:经过超声冲击,焊缝中心及焊趾处的残余应力显著降低,其中纵向残余应力分别降至-944 MPa和-584 MPa,横向残余应力分别降至-881 MPa和-432 MPa。超声冲击显著提高了TC4ELI焊接接头的硬度和冲击韧性,分别提高了约5%和11%。同时,超声冲击后的TC4ELI钛合金接头具有更优的耐腐蚀性。

关键词 TC4ELI;焊接;超声冲击;残余应力;接头性能

中图分类号 TG404

文献标志码 A

文章编号 1004-244X(2026)01-0062-06

DOI:10.14024/j.cnki.1004-244x.20250520.002

Study on performance of TC4ELI titanium alloy TIG welding joint after ultrasonic impact

MA Xiaojun¹, WANG Jinjie¹, ZHANG Deyang^{2,3}, WANG Jun²,
ZHAO Yong¹, WANG Feiyun¹, FU Juan¹

(1.School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212000, China;
2.China Ship Scientific Research Centre, Wuxi 214000, China;
3.National Key Laboratory of Ship Structural Safety, Wuxi 214000, China)

Abstract To solve the problem of high residual stress after welding of TC4ELI titanium alloy for ships, ultrasonic impact (UIT) treatment was applied to the TIG welded joints of TC4ELI titanium alloy. The residual stress, mechanical properties, and corrosion resistance of the joints before and after ultrasonic impact treatment were compared and analyzed. The results show that after ultrasonic impact, the residual stresses at the center and toe of the weld are significantly reduced, with longitudinal residual stresses dropping to -944 MPa and -584 MPa, and transverse residual stresses dropping to -881 MPa and -432 MPa, respectively. Ultrasonic impact significantly improves the hardness and impact toughness of TC4ELI welded joints, with the hardness and impact energy at the center of the weld increase by about 5% and 11%, respectively. Meanwhile, the TC4ELI titanium alloy joint after ultrasonic shock has better corrosion resistance.

Keywords TC4ELI;welding;ultrasonic impact treatment;residual stress;welded joint properties

在当今全球海洋开发中,船舶装备技术日益成为衡量国家综合实力的重要标志。其中,船舶材料的研发与应用更是海洋工程技术创新的关键^[1]。TC4钛合金因其出色的力学性能和耐腐蚀性能,能充分满足船舶材料在强度、韧性和耐海水腐蚀等方面的严苛要求,在船舶工业中得到广泛应用。我国的大国重器“蛟龙号”、“奋斗者号”的船体均由TC4钛合金制成^[2-3]。其中,TC4ELI钛合金通过降低间隙元素C、O、N的含量,进一步提升了材料的塑韧性,为高端船舶装备的发展提供了更优质的材料保障。然而,由于焊接过程中热量分布不均、热循环频繁、冷却速度快及高拘束度等因素^[4],焊后残余应力的产生不可避免,影响结构设计的整体性和结构使用的可靠性^[5]。因此,探索TC4ELI钛合金焊后残余应力分布规律,并进行有效调控是亟待

解决的技术难题。

超声冲击(UIT)作为一种先进的表面加工技术,通过机械振动强化材料表面,可细化晶粒并提高材料的表面硬度,同时在材料表面引入较深的残余压应力层^[6]。目前,超声波冲击残余应力调控技术在工程实践中取得了显著成效。何柏林等^[7]对SMA490BW钢焊接接头进行超声冲击处理,成功降低了接头表面残余拉应力,表层晶粒得到显著细化。ZHAO等^[8]对镍基合金不锈钢管钨极气体保护焊(GTAW)环焊缝实施超声冲击处理。与未处理试样相比,试样的纵向残余应力和横向残余应力均大幅减少。丛家慧等^[9]采用超声冲击(UIT)对TC4钛合金激光焊接头进行处理,发现经处理后接头表面晶粒细化,形成塑性变形层,残余压应力明显提升,平均应力可达-500 MPa。

收稿日期:2025-03-04;修回日期:2025-05-06

基金项目:船舶结构安全全国重点实验室开放基金;中国博士后科学基金(389885)

第一作者:马小俊,女,硕士研究生。E-mail:1792076312@qq.com。

通信作者:赵勇,男,教授。E-mail:yongzhao418@just.edu.cn。

目前,多数学者选择对钢材和TC4钛合金进行焊后超声冲击处理,并对接头的应力分布及组织性能进行研究,然而针对TC4ELI钛合金TIG焊后接头超声冲击的调控研究较少。因此,本文作者对比了TC4ELI钛合金TIG焊超声冲击前后的焊后残余应力,并对其显微硬度、拉伸性能、冲击韧性和腐蚀性能进行了系统的对比分析。通过对TC4ELI钛合金接头残余应力的有效调控,实现钛合金接头综合性能全面提升,为船用钛合金焊接提供了一种有效的调控手段和理论依据。

1 试验及方法

1.1 试验材料

试验材料为350 mm×150 mm×12.5 mm的TC4ELI钛合金板材。焊接材料为TC3钛合金直条焊丝,直径为3 mm。TC4ELI板材和TC3焊丝的化学成分如表1所示。对接试样的尺寸为350 mm×300 mm×12.5 mm,焊缝长度为350 mm。工件单边开30°坡口,试板焊接保留3 mm间隙。焊前需要对待焊接板进行打磨加工。

表1 钛合金名义化学成分(质量分数/%)

Table 1 Nominal chemical composition of titanium alloys (mass fraction/%)

材料牌号	Ti	Al	V	Fe	C	N	H	O
TC4ELI	余量	5.5~6.5	3.5~4.5	0.25	0.08	0.03	0.012	0.13
TC3	余量	4.5~6.0	3.5~4.5	0.30	0.08	0.05	0.015	0.15

1.2 焊接设备与工艺

焊接设备为唐山松下数字IGBT控制直流TIG弧焊电源YC-400TX4。钨针选择直径为3.2 mm的钨钨,并采用直流正接的方式进行焊接。根据实际焊接需求,设计了保护拖罩及背保护装置,保护拖罩可实现对焊接熔池及焊缝的焊后保护;为了避免焊缝背部氧化,选用紫铜背保护装置。为防止试板移动,使用G字夹固定焊接板。焊接工艺参数如表2所示。接头共6层9道。焊接过程中采用99.99%的氩气进行保护。

表2 TC4ELI钛合金TIG焊接工艺参数

Table 2 TC4ELI titanium alloy TIG welding process parameters

焊接道数	焊接电流/A	焊接电压/V	焊接速度/(m·min ⁻¹)
1	151	11.0	0.09
2	180	12.0	0.16
3	200	12.5	0.16
4~9	215	14.0	0.18

为降低钛合金焊接接头残余应力,选用江苏阳明公司制造的JSKD-E焊后超声冲击设备,其配备了直径为3 mm的冲击针和3针头超声冲击枪。工作频率设为20 kHz,振幅为20 μm。每焊完一道,立即对距焊

缝中心两侧50 mm区域进行全覆盖超声冲击。经多次模拟试验,确定冲击枪前进速度为8 mm/s,对焊缝中心和热影响区进行超声冲击,每道冲击8 min。

1.3 测试方法

焊接接头用盲孔法测量应力,检测仪器为济南利美机电科技有限公司生产的LM-12型残余应力检测仪。接头硬度、拉伸性能和冲击性能分别使用德国KB 30S显微硬度计、CMT5205电子万能试验机和JB-300B摆锤式冲击试验机进行测试。电化学测试用传统的三电极测试体系进行,选用质量分数为3.5%的NaCl溶液作为试验介质,每组实验重复测试3次。

2 结果与分析

2.1 超声冲击对焊接接头残余应力的影响

图1为TC4ELI钛合金对接接头的残余应力测试点分布示意图。用盲孔法对对接试板的上表面开展残余应力测试。测试点共7个,沿垂直于焊缝的方向分布,按序依次测量焊缝中心、热影响区以及母材这3个关键位置。测试之前,使用砂纸对测点表面进行打磨,以确保表面平整。残余应力的计算依据GB/T 31310—2014标准进行。

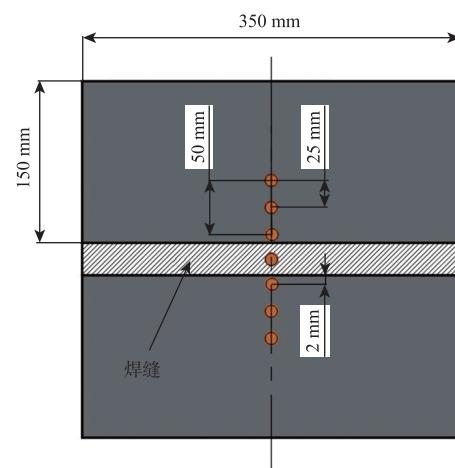


图1 对接接头残余应力测试点示意图

Fig.1 Schematic diagram of test points for residual stresses in butt joint

图2为焊态和超声冲击态的焊后残余应力对比。可以看到,焊后未处理时,沿焊缝垂直方向的纵向和横向残余应力沿焊缝中心呈“M”型对称分布,且主要表现为拉应力。结果表明,热影响区的纵向和横向残余应力最大,分别达到517 MPa和430 MPa。究其原因,主要是由于焊缝边缘处于热影响区,在焊接时温度最高,且在冷却和收缩后,试样的左右两侧都发生了向上的变形,从而形成了较大的残余应力。而母材区距离焊缝

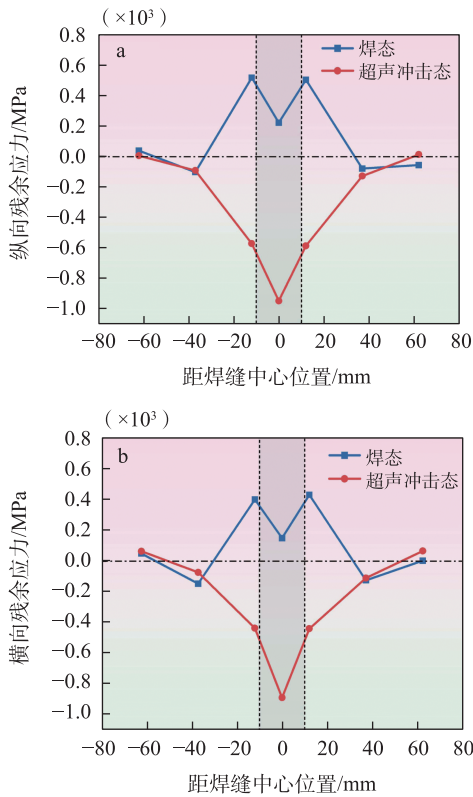


图2 焊态和超声冲击态下的接头残余应力对比

Fig.2 Comparison of residual stresses of joints of welded and ultrasonic impact states

较远,焊接时的温度梯度较小,因此母材区处于一种相对稳定的应力状态。在焊缝中心区域出现了较小的拉应力,其纵向和横向的残余应力分别为222 MPa和151 MPa。焊缝中心的残余应力低于热影响区,这种现象可归因于多层多道焊接过程中,后道焊缝对前道焊缝的热处理作用。从整体上看,在焊接接头的各个区域,纵向应力比横向的大。这是因为焊缝金属纵向残余拘束度大于横向。经超声冲击处理后,焊缝中心及焊趾处的残余应力显著降低,并转变为压应力,其中纵向残余应力分别降至-944 MPa和-584 MPa,横向残余应力分别降至-881 MPa和-432 MPa。这与学者们对TC4钛合金焊后超声冲击的研究一致^[10]。

2.2 超声冲击对焊接接头性能的影响

1) 焊接接头显微硬度

对盖面层进行显微硬度测量,测试点位置如图3所示。有无超声冲击处理的接头显微硬度结果如图4所示。超声冲击态与焊态硬度分布趋势保持一致,即从焊缝中心到母材,接头硬度呈先升高后降低的特征。结果表明,超声冲击对焊接接头进行了有效强化处理,明显提高了其表面硬度,使焊缝中心区域的硬度增加了约5%,热影响区的硬度增加了约8%。在对TC4钛合金焊后超声冲击的研究中也发现了同样的规

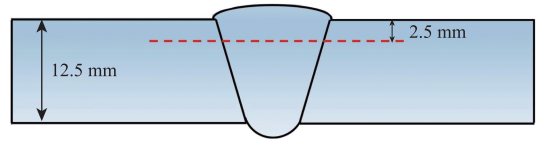


图3 TC4ELI钛合金接头显微硬度测试位置

Fig.3 TC4ELI titanium alloy joint microhardness test position

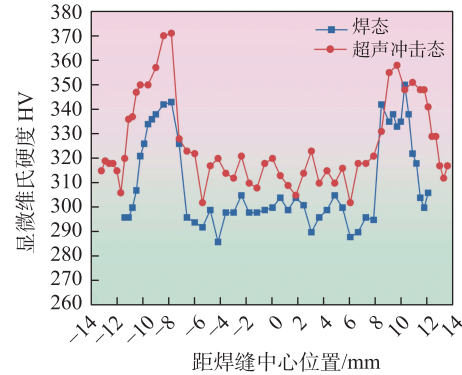


图4 焊态和超声冲击态下的接头显微硬度对比

Fig.4 Comparison of microhardness of joints in welded and ultrasonic impact states

律。这主要归因于加工硬化作用。在超声冲击过程中,工具头以高频率、小振幅对材料表面进行冲击,导致材料表面产生强烈的塑性变形,材料内部的晶粒发生滑移和转动,晶粒之间相互摩擦和挤压,引起材料晶格畸变,晶体结构变得更加复杂。这种晶格畸变增加了位错运动的阻力,使材料在后续受力时更难变形,从而表现为硬度值的显著提升^[11-12]。

2) 焊接接头拉伸性能

表3为有无超声冲击作用下的焊接接头拉伸性能。焊接接头拉伸断裂主要发生在焊缝位置,这主要是因为TC3焊丝与焊接材料是低强匹配。其中焊态接头抗拉强度达到1 012 MPa,由此可见,焊接接头具有较高强度和抵抗变形的能力。经过超声冲击处理后,抗拉强度为1 025 MPa,变化不显著。然而超声冲击处理后,伸长率及断面收缩率均有所提高,这主要归因于超声波冲击带来的晶粒细化效应^[13]。

表3 焊态和超声冲击态拉伸性能对比

Table 3 Comparison of tensile properties between welded and ultrasonic impact states

试样状态	抗拉强度/MPa	伸长率/%	断面收缩率/%	断裂位置
焊态	1 012	2	3	焊缝
超声冲击态	1 025	6	9	焊缝

有无超声冲击处理的接头拉伸断口形貌如图5所示。焊态的拉伸断口中同时存在韧窝和解理面,由此可推断,TC4ELI钛合金TIG焊接头在拉伸过程中呈现混合断裂特征。经超声冲击后,断口的韧窝深度较焊

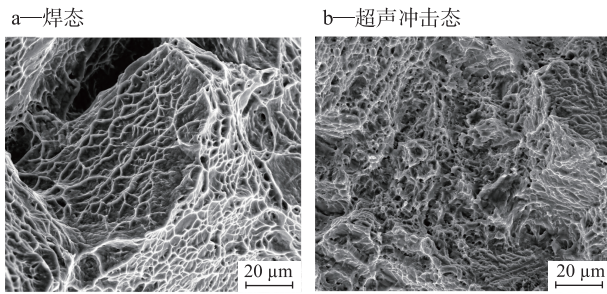


图5 焊态和超声冲击态拉伸断口微观形貌对比

Fig.5 Comparison of tensile fracture micro-morphology between welded and ultrasonic impacted states

态接头明显增加,且韧窝数量更多、分布更密集。根据材料学原理,韧窝尺寸越小、分布越密集,材料的塑性越佳^[14]。结合拉伸试验结果,超声冲击处理后焊接接头的伸长率从焊态的2%提高至6%,断面收缩率从焊态的3%提高至9%,充分证明超声冲击处理能提升焊接接头的塑性。

3)焊接接头冲击性能

图6为焊接态和经超声冲击处理后的接头冲击性能对比。可见,焊缝区的冲击韧性明显高于热影响区。这一现象可以从材料组织学角度解释:热影响区尤其是过热区的晶粒因受到焊接高温热源影响而显著粗化,导致该区域吸收冲击能量的能力降低。与焊接原始状态相比,经超声冲击处理后,焊缝中心区域的冲击韧性为59 kJ/cm²,较焊态提高了11%;热影响区的冲击韧性为48 kJ/cm²,较焊态提高了26%。这是由于在超声冲击作用下,焊缝表面的晶粒变细,并且在试板的上表面附近形成了一层加工硬化层,从而显著提高了冲击韧性。

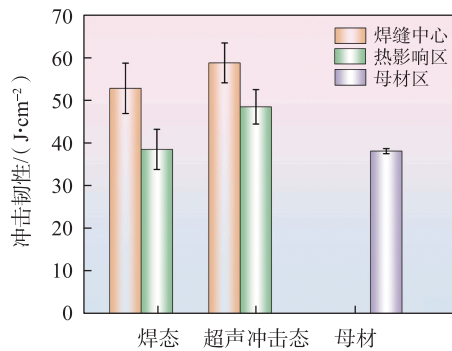


图6 有无超声冲击作用的焊接接头冲击结果对比
Fig.6 Comparison of impact results of welded joints with and without ultrasonic impact effect

有无超声冲击作用的接头断口形貌如图7所示。从韧窝深度来说,焊态试样的冲击断口呈现出较深的韧窝特征。但经超声冲击处理后,韧窝数量明显增加。结合冲击试验结果分析可知,超声冲击处理能有

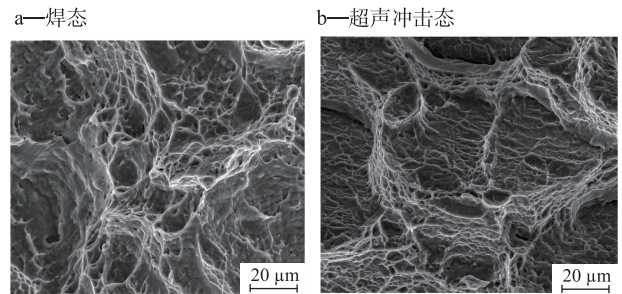


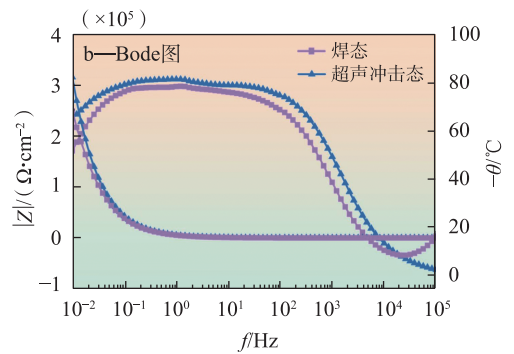
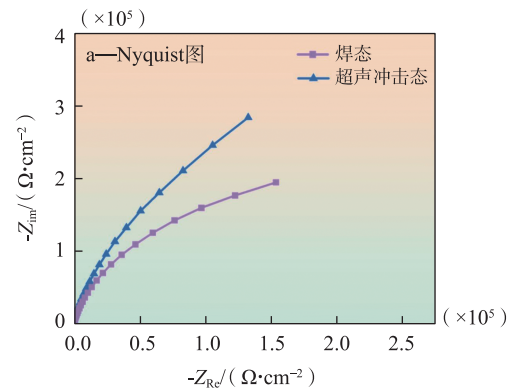
图7 焊态和超声冲击态断口微观形貌对比

Fig.7 Comparison of microscopic morphology of fracture in welded state and ultrasonic impact state

效提高焊接接头的韧性。

4)焊接接头腐蚀性能

用质量分数为3.5%的NaCl溶液模拟海水电解液,对TC4ELI钛合金焊接接头开展有无超声冲击处理的腐蚀性能对比分析。图8是在质量分数为3.5%的NaCl溶液中,焊接接头的电化学阻抗谱测试结果。结果表明,在质量分数为3.5%的NaCl溶液中,TC4ELI合金



c—等效电路

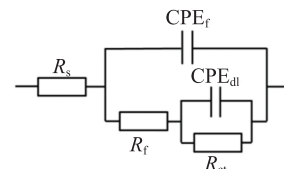


图8 焊态和超声冲击态焊接接头电化学阻抗谱图对比
Fig.8 Comparison of electrochemical impedance spectra of joints in welded and ultrasonic impact states

的Nyquist曲线呈不完整的半圆状。相比于焊态,超声冲击态容抗弧的曲率半径较大。容抗弧的曲率半径越大,意味着合金的耐蚀性能越强。初步判断,超声冲击态的耐蚀性更强。观察Bode图可知,超声冲击未改变相位角的变化趋势,在曲线低频区(10^{-2} ~ 10^1 Hz)内,焊接态和超声冲击态的相位角均先增加后减小。基于图8中的等效电路图进行拟合,所得拟合结果如表4所示。各参数物理意义: R_s 为溶液电阻; R_{ct} 为表征界面电荷转移电阻; R_f 为极化电阻; CPE_{dl} 由双电层电容 C_d 和弥散系数 n_d 组成; CPE_f 由膜电容 C_f 和弥散系数 n_f 组成。超声冲击态的极化电阻 R_f 为 $11.28 \Omega/\text{cm}^2$,小于焊态极化电阻 $14.53 \Omega/\text{cm}^2$,表明超声冲击处理后TC4ELI焊接接头中的钝化膜具有更低的腐蚀速率,表现出更优异的耐蚀性能。

表4 焊态和超声冲击态焊接接头的阻抗谱拟合数据

Table 4 Impedance spectra fitting data of butt joints in welded and ultrasonic shock states

试样状态	$R_s/(\Omega \cdot \text{cm}^{-2})$	$CPE_{dl}/(\mu\text{F} \cdot \text{cm}^{-2})$	n_d	$R_f/(\Omega \cdot \text{cm}^{-2})$	$CPE_f/(\mu\text{F} \cdot \text{cm}^{-2})$	n_f	$R_{ct}/(\Omega \cdot \text{cm}^{-2})$
焊态	6.31	0.394	0.819	14.53	37.85	0.862	6.157×10^5
超声冲击态	7.117	22.62	0.895	11.28	12.51	0.884	1.159×10^6

图9为TC4ELI钛合金焊态和超声冲击态对接接头在质量分数为3.5%的NaCl中的动电位极化曲线。由图可见,焊态和超声冲击态的动电位极化曲线均呈较长的钝化区,拟合后的腐蚀电位和腐蚀电流密度如表5所示。考虑到腐蚀电压存在误差,主要通过腐蚀电位密度来表征耐腐蚀性^[15]。超声冲击处理后,接头焊缝区域的腐蚀电流密度降至 $1.233 \times 10^{-7} \text{ A}/\text{cm}^2$,低于未处理焊态的 $1.256 \times 10^{-7} \text{ A}/\text{cm}^2$,这表明,超声冲击提高了焊接接头的抗腐蚀能力。

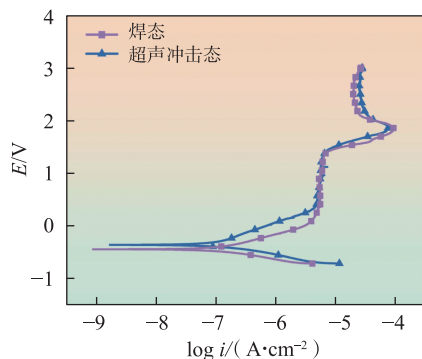


图9 焊态和超声冲击态焊接接头动电位极化曲线图对比
Fig.9 Comparison of potential polarization curves of joints in welded and ultrasonic impact states

表5 焊态和超声冲击态焊接接头动电位极化曲线参数对比

Table 5 Comparison of parameters of potential polarization curves of butt joints in welded and ultrasonic impact states

试样状态	E_{cor}/V_{SCE}	$I_{cor}/(\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$
焊态	-0.438	1.256×10^{-7}
超声冲击态	-0.344	1.233×10^{-7}

超声冲击处理后的焊接接头的耐腐蚀性更佳,主要得益于表面形成了致密均匀的钝化膜。超声冲击使表面层晶粒尺寸显著减小,同时残余应力由拉应力转变为压应力,这2种效应对钝化膜的形成过程和形成速率均起到了促进作用,进而使接头表现出更优异的耐腐蚀能力。

3 结论

1) 焊态焊缝中心和焊趾处为拉应力,纵向残余应力分别为222 MPa和517 MPa,横向残余应力分别为151 MPa和430 MPa。超声冲击处理后,焊缝中心及焊趾处的残余应力显著降低,纵向残余应力分别降至-944 MPa和-584 MPa,横向残余应力分别降至-881 MPa和-432 MPa。

2) 焊后超声冲击显著提高了TC4ELI焊接接头的硬度和冲击韧性。超声冲击处理后焊缝中心区域和热影响区的硬度分别提高了约5%和8%,焊缝中心区域和热影响区的韧性分别提高了11%和26%。

3) 焊后超声冲击后的TC4ELI钛合金接头具有更优异的耐腐蚀性。

4 参考文献

- [1] 吴建新. 钛合金材料在船舶材料上的应用[J]. 船舶物资与市场, 2020(8):5-6.
WU Jianxin. Application of titanium alloy materials on ship materials[J]. Ship Materials and Markets, 2020(8):5-6. (in Chinese)
- [2] HUANG J, LIU S, YU S, et al. Arc deposition of wear resistant layer TiN on Ti6Al4V using simultaneous feeding of nitrogen and wire [J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 381: 125141.
- [3] FANG N, GUO E, HUANG R, et al. Effect of welding heat input on microstructure and properties of TC4 titanium alloy ultra-narrow gap welded joint by laser welding with filler wire [J]. Materials Research Express, 2021, 8(1):16511.
- [4] 曾泽群. 面向轨道车辆的TC4钛合金焊接残余应力预测与调控方法研究[D]. 大连:大连交通大学, 2023.
ZENG Zequn. Research on TC4 titanium alloy welding in-

- duced residual stress prediction and regulation method for railway vehicles [D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2023. (in Chinese)
- [5] 冯雪娜,刘亚良,杨鑫华,等. Q345E钢多层多道焊残余应力的数值模拟与试验研究[J]. 焊接技术,2017,46(11):5-9. FENG Xuena, LIU Yaliang, YANG Xinhua, et al. Numerical simulation and experimental study of residual stresses in multi-layer multi-pass welding of Q345E steel[J]. Welding Technology, 2017, 46(11): 5-9. (in Chinese)
- [6] LI M, QI Z, BIN H, et al. Investigation on microstructure and properties of $Al_xCoCrFeMnNi$ high entropy alloys by ultrasonic impact treatment[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 816: 152626.
- [7] 何柏林,金辉,张枝森,等. SMA490BW钢对接接头高周疲劳性能的机理探究[J]. 材料导报,2018,32(12):2008-2014. HE Bolin, JIN Hui, ZHANG Zhisen, et al. Mechanism of improving the high cycle fatigue property of SMA490BW steel butt joint [J]. Materials Herald, 2018, 32 (12) : 2008-2014. (in Chinese)
- [8] ZHAO X, REN K, LU X, et al. Influence of ultrasonic impact treatment on microstructure and mechanical properties of nickel-based alloy overlayer on austenitic stainless steel pipe butt girth joint[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2022, 54 (11):4072-4083.
- [9] 丛家慧,徐永臻,王磊,等. 超声冲击对TC4钛合金激光焊接接头疲劳性能的影响[J]. 稀有金属,2022,46(11):1414-1421. CONG Jiahui, XU Yongzhen, WANG Lei, et al. Ultrasonic impact treatment on fatigue properties of laser welded joints of TC4 titanium alloy [J]. Rare Metals, 2022, 46 (11) : 1414-1421. (in Chinese)
- [10] 林靖宇. TC4钛合金激光自熔焊接头组织性能及焊后超声冲击强化研究[D]. 镇江:江苏科技大学,2023. LIN Jingyu. Study on the microstructure and properties of TC4 titanium alloy laser self fusion welded joint and post weld ultrasonic impact strengthening [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2023. (in Chinese)
- [11] 倪永恒,朱有利,侯帅. 超声冲击处理时间对17CrNiMo6钢表层组织细化与性能的影响[J]. 材料工程,2018,46(11):155-160. NI Yongheng, ZHU Youli, HOU Shuai. effects of ultrasonic impact treatment time on surface structure refinement and properties of 17CrNiMo6 steel [J]. Materials Engineering, 2018, 46 (11) : 155-160. (in Chinese)
- [12] WANG F, LIU Y, ZHANG B, et al. Strengthening effect in laser metal deposited Ti6Al4V alloy via layer-by-layer ultrasonic impact treatment [J]. Materials Science and Engineering: A, 2023, 886: 145693.
- [13] 高立强,张德川,顾邦平,等. 超声冲击处理对S355钢表层组织及力学性能的影响[J]. 机械强度,2024,46(2):286-291. GAO Liqiang, ZHANG Dechuan, GU Bangping, et al. Effects of ultrasonic impact treatment on microstructure and mechanical properties of S355 steel [J]. Journal of Mechanical Strength, 2024, 46(2) : 286-291. (in Chinese)
- [14] 刘涛,史正宏,雷经发,等. TC4钛合金在不同固溶温度下的微观结构及动态力学行为[J]. 材料热处理学报,2024,45(12):100-109. LIU Tao, SHI Zhenghong, LEI Jingfa, et al. Microstructure and dynamic mechanical behavior of TC4 titanium alloy at different solution treatment temperatures [J]. Journal of Materials Heat Treatment, 2024, 45(12) : 100-109. (in Chinese)
- [15] 宋坤林,王婷,张心周,等. 轨道交通用TC4钛合金TIG焊接头耐腐蚀性能研究[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2022,36(3):37-41. SONG Kunlin, WANG Ting, ZHANG Xinzhou, et al. Study on corrosion resistance of TC4 titanium alloy TIG joint for rail transit [J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 36(3) : 37-41. (in Chinese)