

转向架用TC4钛合金TIG焊接头组织与力学性能研究

张 航¹ 刘 杰² 杜雨欣¹ 王大臣¹ 赵爱民¹

(1 中车长春轨道客车股份有限公司, 长春 130062)

(2 长春工程学院, 长春 130012)

摘 要 针对高铁转向架焊接结构复杂、对强度与轻量化要求高的特点,选用比强度高、可焊性好的TC4钛合金,采用钨极惰性气体保护焊(TIG)工艺,对厚度为14 mm的TC4钛合金板材开展对接接头与T形接头焊接试验。结果表明:两种接头焊缝成形良好,焊核区组织均为柱状晶和细长针状马氏体 α' 相,热影响区由 α' 相与 $(\alpha+\beta)$ 相混合组织构成,母材区为 $(\alpha+\beta)$ 双相;对接接头焊核区透射电子显微镜(TEM)形貌显示,存在平直条状 α' 相及高密度位错,热影响区位错密度显著降低,母材区 α 相晶界处存在位错壁;对接接头焊接试样的抗拉强度平均值和断后伸长率平均值分别为981 MPa和5.5%,均低于母材;-40℃低温下,对接接头试样的冲击功平均值为19.51 J,明显低于母材。硬度分布方面,对接接头硬度从焊缝中心到母材呈现高、低、高的变化趋势,焊缝区的硬度高于母材;T形接头硬度从焊缝中心到母材呈现下降趋势,焊核区的硬度最高。

关键词 钛合金,轨道交通,TIG焊接,微观组织,力学性能

中图分类号: TG407

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2026.03.013

Research on Microstructure and Properties of TC4 Titanium Alloy by TIG Welding for Bogie

ZHANG Hang¹ LIU Jie² DU Yuxin¹ WANG Dachen¹ ZHAO Aimin¹

(1 CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd, Changchun 130062)

(2 Changchun Institute of Technology, Changchun 130012)

Abstract The complex welding structure of the high-speed rail bogie and the demand for high strength and lightweight, the TC4 titanium alloy with high specific strength and good weldability was selected. Using the non-melting tungsten inert gas (TIG) arc welding process, welding experiments for butt joints and T-joints were conducted on TC4 titanium alloy plates with a thickness of 14 mm. The results indicate that both types of joint welds demonstrate favorable formation. The microstructure in the nugget zone comprises columnar crystals and elongated acicular martensite α' phase, whereas the heat-affected zone consists of α' phase and $(\alpha+\beta)$ phase, and the base metal zone is composed of $(\alpha+\beta)$ dual-phase. Transmission electron microscopy (TEM) observations of the nugget zone in the butt joint reveal straight, strip-like α' phase formations along with high-density dislocations. In contrast, the dislocation density in the heat-affected zone is notably reduced, and dislocation walls are observed within the α phase grain boundaries in the base metal zone. The average tensile strength and average elongation after fracture of the butt joint welding specimens are 981 MPa and 5.5% respectively, both of which are lower than those of the base metal. The impact energy of the weldment at -40℃ is 19.51 J, also significantly lower than that of the base metal. Regarding hardness distribution, the hardness of the butt joint exhibits a high-low-high trend from the weld center to the base metal, with the hardness value in the weld zone exceeding that of the base metal. For the T-joint, hardness decreases from the weld center to the base metal, with the nugget zone displaying the highest hardness.

Key words Titanium alloy, Rail transit, TIG welding, Microstructure, Mechanical properties

收稿日期: 2024-08-15

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20220101257JC)

第一作者简介: 张航, 1985年出生, 硕士, 高级工程师, 主要从事材料失效及连接技术的研究工作。E-mail: 13104407541@163.com

0 引言

轨道车辆的发展及更新换代,与车辆材料轻量化的研究应用密不可分^[1-4]。转向架作为高速列车的核心部件之一,其作用是保障列车安全平稳地运行。随着列车速度的不断提升,未来高速列车有望达到 400 km/h。转向架作为列车的主要承载结构,列车速度的提升对其性能提出了更高的要求。而钛合金凭借自身的优异特性,恰好能满足这一需求,成为轨道车辆承载结构的理想轻量化材料。

依据相组成分类,钛合金可分为 α 型、 β 型以及($\alpha+\beta$)型三类。从显微组织与性能角度来看, α 型钛合金高温稳定性好、焊接性能优异; β 型钛合金强度高、冷成形加工性能突出;而($\alpha+\beta$)型钛合金则兼具两者的优点,综合性能更均衡。

TC4 钛合金是典型的($\alpha+\beta$)型钛合金,具有高比强度、高抗拉强度、高剪切强度、高疲劳强度,同时耐腐蚀性能优异,力学稳定性与抗氧化能力良好^[5-9]。此外,TC4 钛合金的焊接工艺性能良好,可采用 TIG 等方法完成构件成形加工^[10-12]。

陈今良等人^[13]采用 TIG 焊接工艺,研究了电流参数对 3 mm 厚 TC4 板材焊接接头显微硬度的影响,发现焊缝区硬度高于母材区硬度。宋坤林等人^[14]对对轨道交通用 5 mm 厚 TC4 钛合金板材的 TIG 焊接接头进行了耐腐蚀性能研究,发现海水环境对接头力学性能的影响不明显,表明接头具有良好的耐海水腐蚀性能。

基于钛合金中厚板在轨道交通领域的应用研究较少,本文采用 TIG 多层多道焊接工艺,以 14 mm 厚的 TC4 钛合金板材为试验材料,分别开展对接接头和 T 型接头的焊接试验,分析焊接接头不同区域的显微组织特征与力学性能,为钛合金在列车转向架结构件上的焊接应用提供理论依据与试验参考。

1 试验

1.1 材料

试验用轧制工艺处理的 TC4(Ti6Al4V)板材作为母材,尺寸为 400 mm×150 mm×14 mm,实测化学成分见表 1。

表 1 TC4 钛合金化学成分
Tab. 1 Measured chemical compositions of TC4 alloy
%(质量分数)

Al	V	Fe	C	N	H	O	Ti
6.3	4.0	0.30	0.08	0.05	0.015	0.20	余量

焊接填充材料选用直径为 2.4 mm 的 ERTi6Al4V 钛合金焊丝,材料符合 GB/T 3623—2022《钛及钛合金丝》要求,焊丝化学成分见表 2。

表 2 ERTi6Al4V 钛合金焊丝化学成分

Tab. 2 Chemical compositions of ERTi6Al4V alloy welding wire

wire							%(质量分数)
Al	V	Fe	C	N	H	O	Ti
5.5~6.75	3.5~4.5	0.25	0.05	0.05	0.012	0.18	余量

1.2 试验方案

采用半自动 TIG 焊工艺,分别完成对接接头和 T 型接头的多层多道焊接,焊接工艺参数见表 3。

表 3 焊接工艺参数
Tab. 3 Welding parameter

板厚 /mm	焊缝层 道数/道	焊接电流 /A	焊接电压 /V	焊接速度 /mm·min ⁻¹	气体流量 /L·min ⁻¹
14	12~15	110	17~18	80	18~20

1.3 试验设备

试验所用的显微观察设备和力学性能检测设备主要包括:蔡司 Axio Observer 型光学显微镜、JEOL-5600 型扫描电子显微镜(SEM)、FEI Talos F200 型透射电子显微镜(TEM)、YDL300 型液压万能试验机(图 1)、HVS-30ZC 型硬度仪、DWF-60A 型冲击试验机(图 2)。



图 1 液压万能试验机

Fig. 1 Hydraulic universal testing machine

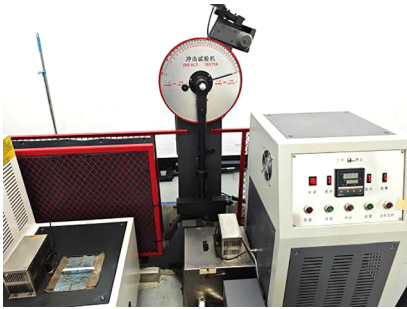


图 2 冲击试验机

Fig. 2 Impact testing machine

1.4 测试方法

焊后从两类焊接接头上切取金相试样,经打磨抛光后,采用配比为 HF:HCl:HNO₃:H₂O=1 mL:1.5 mL:2.5 mL:95 mL 的腐蚀液对试样进行腐蚀。利用光学显微镜进行组织观察,利用扫描电子显微镜、透

射电子显微镜观测微观形貌。

对接接头试样按照 ISO 15614-5:2024《金属材料 焊接工艺规范和评定 焊接工艺试验 第5部分：钛、锆及其合金的电弧焊》进行横向拉伸与硬度试验,并按照 GB/T 2650—2022《金属材料焊缝破坏性试验 冲击试验》进行冲击试验。

T形接头试样按 ISO 15614-5 进行硬度试验。

母材按照 GB/T 228.1—2021《金属材料 拉伸试验 第1部分：室温试验方法》、GB/T 4340.1—2024《金属材料 维氏硬度试验 第1部分：试验方法》、GB/T 229—2020《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》开展力学性能试验。

TC4 钛合金对接接头显微硬度测试点的位置如图 3 所示,T形接头显微硬度测试点位置如图 4 所示,测试点间距均为 1 mm。

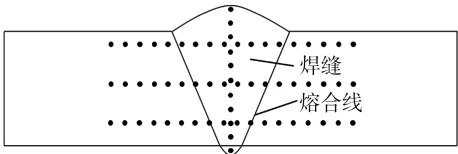


图3 对接接头硬度测试点位置图
Fig. 3 Microhardness location of butt weld joint

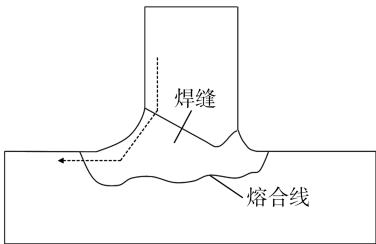


图4 T形接头硬度测试点位置图
Fig. 4 Microhardness location of T-weld joint

2 结果与讨论

2.1 宏观形貌

对接焊缝的表面宏观形貌如图 5 所示。T形焊缝的表面宏观形貌如图 6 所示。两种焊缝的表面成形良好,没有咬边、焊瘤、未熔合、烧穿、开裂等缺陷。

对接接头横截面宏观形貌如图 7 所示,焊道之间熔合良好,无明显气孔、裂纹、夹杂等缺陷。



图5 对接焊缝表面宏观形貌
Fig. 5 Macro morphology of butt weld surface

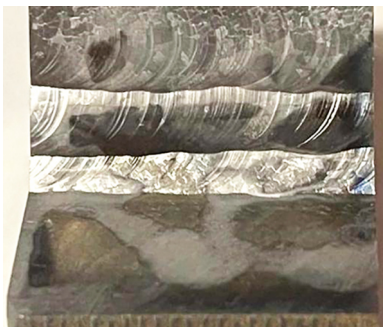


图6 T形焊缝表面宏观形貌
Fig. 6 Macro morphology of T-weld surface

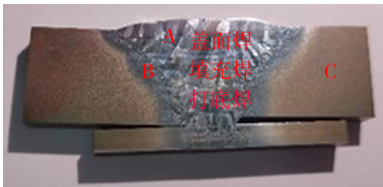


图7 对接接头横截面形貌
Fig. 7 Section morphology of butt weld joint

T形接头横截面宏观形貌如图 8 所示,未见咬边、焊瘤、未熔合、烧穿、开裂等缺陷,焊道之间熔合良好。

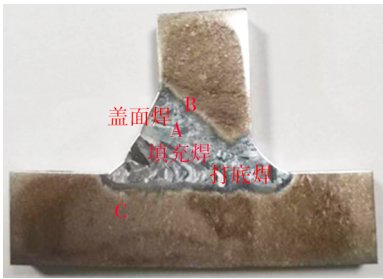


图8 T形接头横截面形貌
Fig. 8 Section morphology of T-weld joint

两类焊接接头均可划分为焊缝区(A)、热影响区(B)、母材区(C)。依据施焊层次,焊缝区分为盖面焊层、填充焊层和打底焊层。进一步观察发现,打底焊层和盖面焊层均分布着较为粗大的柱状晶。

2.2 显微组织分析

2.2.1 对接接头

TC4 钛合金 TIG 焊对接接头不同区域显微组织形貌如图 9 所示。焊缝区组织由粗大的原 β 相柱状晶粒、少量的针状 α 相、呈束状分布的细长针状马氏体 α' 相组成。束内针状马氏体相互平行,不同取向的束彼此交错^[15]。

焊缝中心区域在相变温度以上停留时间最长、冷却最慢,导致 β 相晶粒显著粗大,晶界曲率趋向平直,晶粒垂直于熔合线向焊缝中心生长,形成柱状晶形貌特征。后续冷却过程中, β 相发生马氏体相变,使 β 相晶粒转化为针状马氏体 α' 相,但原 β 相晶界被

保留。该相变以无扩散切变方式进行,生成的 α' 相长宽比大,呈针状。同一束内的 α' 具有相同的晶体学取向,彼此平行排列。不同取向的 α' 束相互交错,并被残留的 β 相晶界分隔开。马氏体分布密集、交错无序,构成网篮状结构,见图9(a)~图9(c)。

图9(d)为热影响区的显微组织形貌。因钛合金导热性较差,焊接热循环过程中该区域经历了极高的加热温度和随后的快速冷却。位于相变温度以上

的热影响区,在冷却过程中,随着温度降低,靠近焊缝区的 β 相在晶界处发生马氏体转变形成针状 α' ,远离焊缝的区域温度较低,保留未转变的 α 相和残余 β 相。两者共同组成交错组织。

图9(e)为TC4钛合金母材 α 相和 β 相的双相组织,其中白色块状为 α 相,黑色网状为 β 相, β 相依附于 α 相晶界呈均匀分布。

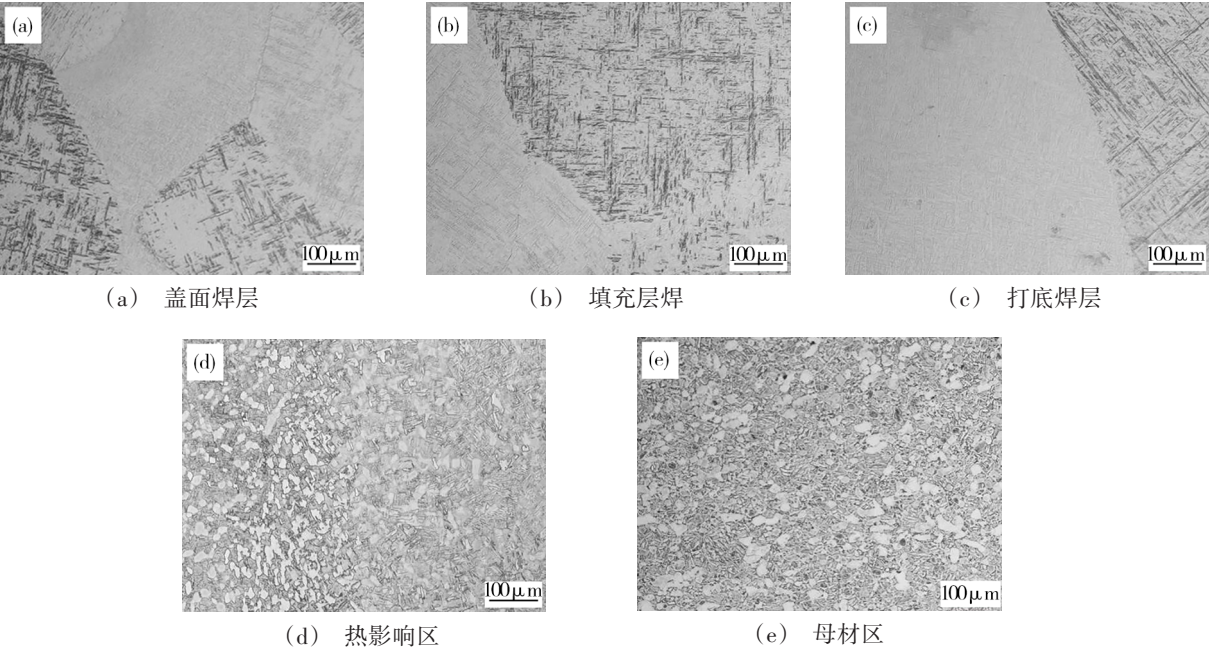


图9 对接接头金相组织形貌
Fig. 9 Metallographic structure of butt weld joint

2.2.2 T形接头

TC4钛合金TIG焊T形接头不同区域的金相组

织形貌如图10所示。

T形接头焊缝区的组织与对接接头焊缝区的组

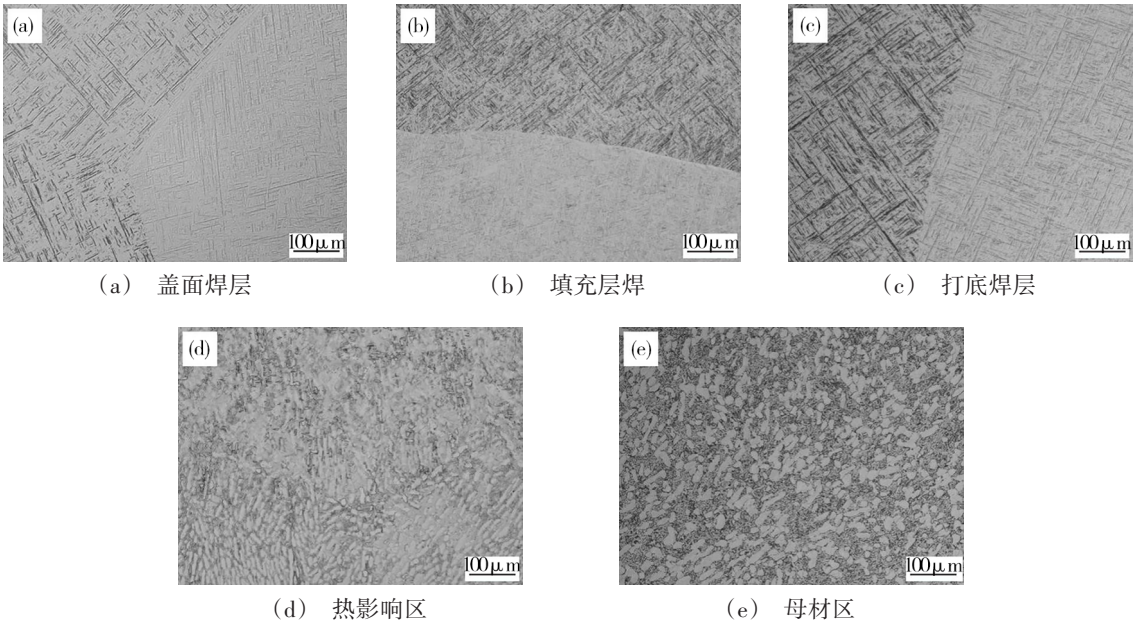


图10 T形接头金相组织形貌
Fig. 10 Metallographic structure of T-weld joint

织相同,均为粗大的 β 相柱状晶粒、针状马氏体 α' 相和少量针状 α 相,其组织转变过程也与对接接头焊缝相似,如图10(a)–图10(c)所示。

图10(d)中热影响区的组织为 $\alpha'+(\alpha+\beta)$ 相。与对接接头的热影响区相比,该区域组织中次生片状 α 相及 α' 相的含量显著增加,呈现出复杂的交错形貌,这主要是由于T型接头在补强焊时,经历了二次热循环,热输入叠加,导致高温停留时间延长,冷却速度相对减缓,促进了亚稳 β 相的分解及次生 α 相的析出。

图10(e)为母材区,呈现原始 $(\alpha+\beta)$ 双相组织。

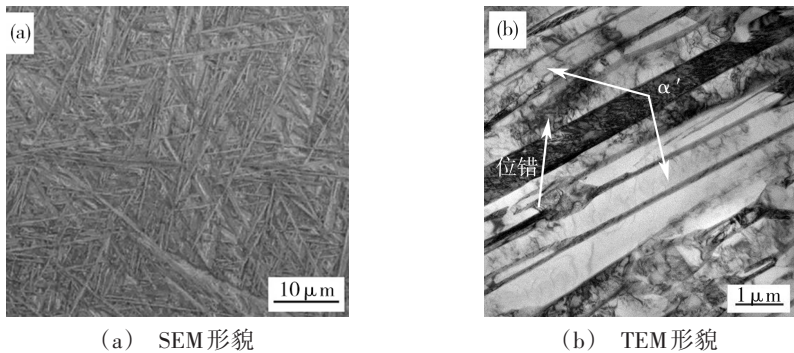


图11 对接接头焊核区微观组织形貌特征

Fig. 11 Microstructure of the weld nugget zone in butt weld

2.3.2 热影响区

对接接头热影响区的微观组织形貌特征如图12所示。由图12(a)可见,与焊核区中细针状 α' 相比较,热影响区中形成大量散乱分布的短小 α' 相, α' 相与原始 α 相边界明显。由图12(b)可见, α' 相在局部呈平行排列,但不同取向的 α' 相之间相互交叉。这

2.3 对接接头精细微观结构分析

2.3.1 焊核区

对接接头焊核区的微观组织形貌特征如图11所示。由图11(a)可见,单一柱状晶内细针状马氏体 α' 相纵横交错排列,形成网篮状组织。切变形成的 α' 相取向各异,沿不同散热方向生长。由图11(b)可见, α' 相呈平直条状,局部平行排列,具有六方密堆结构^[16]。进一步观察, α' 相内部存在大量位错,局部位错密度较高,形成位错塞积。在钛合金动态变形过程中,这些高密度位错有助于提高焊核区的动态强度。

是因为在马氏体相变开始温度以下,高温 β 相向 α' 马氏体转变时, α' 相形核但生长受限,导致转变形成的 α' 马氏体细小、尺寸较小、呈棒状,多个 α' 相之间相互交叉^[17]。此外,在原始 α 相边缘还观察到少量的残余 β 相,且该区域组织中的位错密度较焊核区明显降低。

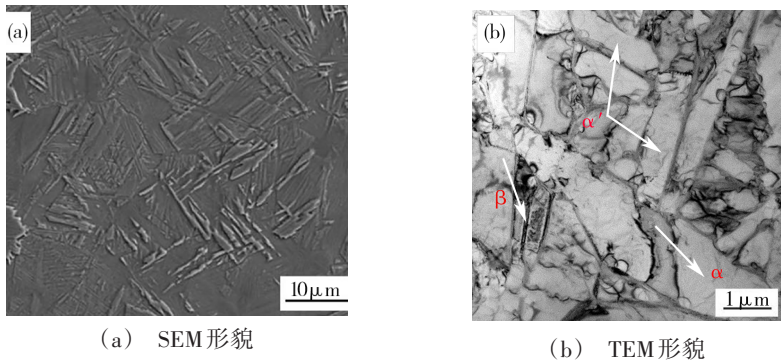


图12 对接接头热影响区微观组织形貌特征

Fig. 12 Microstructure of the heat-affected zone in butt weld

2.3.3 母材区

对接接头母材区的微观组织形貌特征如图13所示。由图13(a)可见,母材区组织以 α 相为主, α 相呈等轴晶,晶粒呈不规则多边形或近圆形;晶界处的 β 相均匀分布在 α 相周边,两相界面清晰。

由图13(b)可见,母材基体内分布着细小的 α 相亚晶粒,亚晶界处形成位错壁,位错线沿晶界分布,主要集中在 α 相的晶界及亚晶界区域;晶间分布有独立的 β 相。因此,当钛合金基体发生形变时, α 相需要克服位错壁的阻碍,比 β 相消耗更多的能量。与

焊核区相比,母材区的位错密度明显降低。

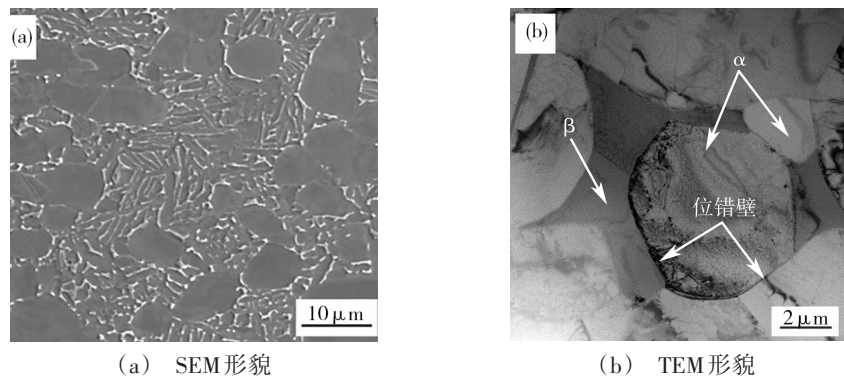


图 13 对接接头母材区微观组织形貌特征

Fig. 13 Microstructure of the Base metal in butt weld

通过对焊接接头不同区域微观组织特征的分析可知,焊接过程中基体组织发生了根本性的变化,其相组成和结构变化,将在宏观上表现为力学性能的差异。

2.4 力学性能分析

2.4.1 室温拉伸性能

对接接头焊接试样、母材试样的拉伸性能试验结果如表4所示。由表4计算得出,焊接接头试样的抗拉强度平均值为981 MPa、断后伸长率平均值为5.5%;母材试样的抗拉强度平均值为1 028 MPa、断后伸长率平均值为15.0%。

表 4 对接接头及母材的室温拉伸性能
Tab. 4 Tensile properties

试样编号	抗拉强度/MPa	断后伸长率/%	断裂位置
焊接件-1	985	5.5	焊缝
焊接件-2	977	5.5	焊缝
母材-1	1 021	14.0	标距内
母材-2	1 035	15.5	标距内

试验结果表明,焊接接头的抗拉强度、母材的抗拉强度和断后伸长率均符合GB/T 3621—2022《钛及钛合金板材》中TC4钛合金板材的技术要求。然而,焊接接头试样的平均断后伸长率为5.5%,为母材的36.7%,未达到GB/T 3621中9%的规定。这主要是因为焊缝组织中存在粗大的 β 相晶界,以及由 β 相晶格重构转变而成的针状马氏体 α' 相,在拉伸变形过程中难以协调变形,限制了材料的塑性流动能力,导致塑性变形阶段缩短,从而伸长率大幅降低。

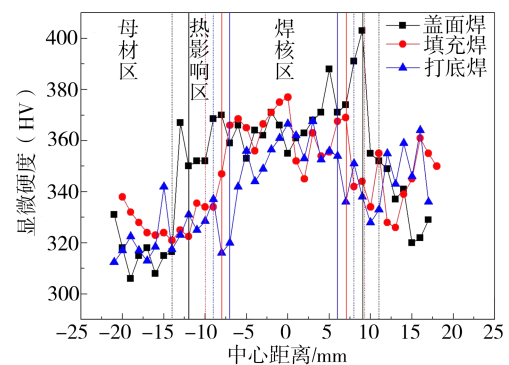
2.4.2 显微硬度

2.4.2.1 对接接头硬度

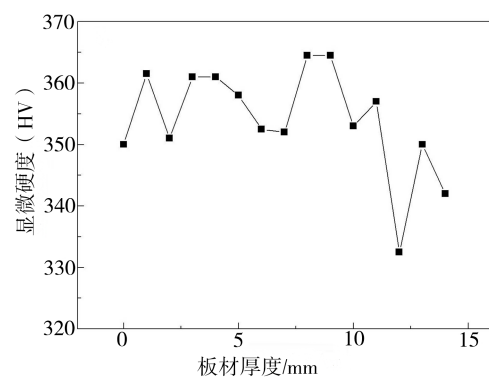
对接接头不同焊层横截面方向和板材厚度方向的显微硬度分布如图14所示。

由图14(a)可知,从焊缝中心到母材,接头硬度

值呈现高、低、高的变化趋势,即从焊缝中心到热影响区硬度值逐渐下降,从热影响区到母材硬度值逐渐升高,且焊缝区的硬度值高于母材。这是由于焊缝金属在冷却过程中,高温 β 相转变为针状 α' 马氏体,且焊缝区的 α' 相数量明显多于热影响区,因此焊缝区硬度最高;而在热影响区,部分 β 相转变为生长不充分的短棒状 α' 相^[18],导致该区域硬度降低;随着向母材过渡,组织逐渐恢复,硬度也逐渐恢复至母材水平。



(a) 不同焊层横截面方向



(b) 焊核区板材厚度方向

图 14 对接接头显微硬度分布

Fig. 14 Microhardness distribution of butt weld joint

由图 14(b)可知,在焊缝区内,盖面焊层的显微硬度略高于打底焊层。此外,打底焊层的热影响区宽度增大,导致软化区向母材方向扩展。

综合图 14(a)和图 14(b)两个方向的显微硬度分布,对接接头的薄弱区位于打底焊层的热影响区(硬度最低处)。

2.4.2.2 T形接头硬度

T形接头显微硬度分布如图 15 所示,从焊核区至热影响区再到母材区,硬度呈逐渐下降趋势,其中焊核区硬度最高,热影响区次之,母材区最低。该硬度变化趋势与接头各区域的相组成密切相关。

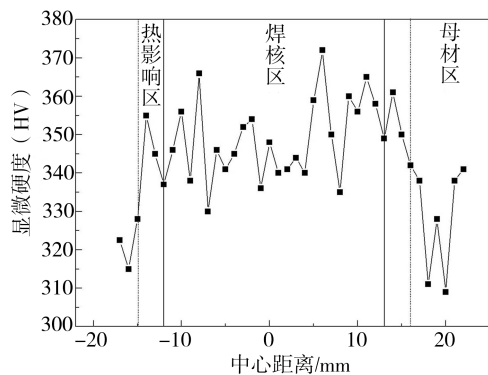


图 15 T形接头显微硬度分布
Fig. 15 Microhardness distribution of T-weld joint

2.4.3 低温冲击性能与断裂机制

高速动车经常运行于寒冷地区,焊接接头的低温冲击性能至关重要。对接接头焊接试样、母材试

样在-40℃条件下的冲击试验结果如表 5 所示。由表 5 计算得出,焊接接头试样的低温冲击功平均值为 19.51 J,母材试样的低温冲击功平均值为 41.50 J。焊接接头试样的冲击功明显低于母材,且不足母材的 50%。这是由于焊接试样的 V 形缺口开在焊缝处,焊缝组织中粗大的 β 相晶粒在冷却过程中转变为大量塑性较差、硬度高的 α' 相,在低温环境中脆性增加,组织变形协调性较差,从而降低了冲击韧性。

为进一步分析冲击功的差异,对母材试样和对接接头试样的冲击断口形貌进行了观察,如图 16 所示。从图 16(a)可以看出,对接接头试样断口上的韧窝稀少且浅,撕裂棱不明显,呈现解理特征,断口属于脆性解理断裂。从图 16(b)可以看出,母材试样的断口形貌呈现等轴韧窝,密度大且分布均匀,撕裂棱明显,呈现出韧性断裂特征。断口微观形貌的差异,在宏观上表现为焊接接头试样的冲击功低于母材。

表 5 对接接头及母材冲击性能
Tab. 5 Impact properties

试样编号	试样尺寸/mm	试验温度/℃	冲击功/J
焊接件-1	55×10×10	-40	19.76
焊接件-2	55×10×10	-40	18.27
焊接件-3	55×10×10	-40	20.51
母材-1	55×10×10	-40	41.14
母材-2	55×10×10	-40	35.89
母材-3	55×10×10	-40	47.48

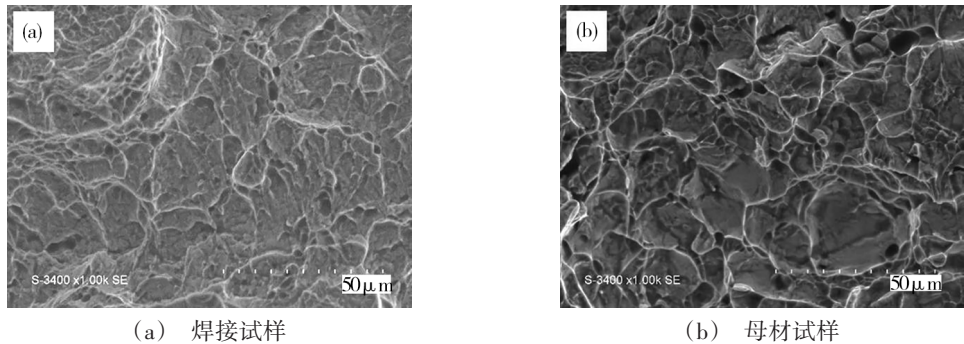


图 16 冲击断口形貌
Fig. 16 Impact fracture morphology

3 结论

(1)对接接头和 T 形接头焊缝组织均为粗大的 β 相柱状晶、针状马氏体 α' 相和少量的 α 相;热影响区由 α' 相与 $(\alpha+\beta)$ 混合组织构成,母材区组织为 $(\alpha+\beta)$ 双相。

(2)对接接头微观组织中,焊核区 TEM 形貌观察显示, α' 相呈平直条状,内部存在高密度位错;热影响区 α' 马氏体尺寸较小,呈棒状,位错密度较焊核区明显降低;母材基体内分布着细小的 $(\alpha+\beta)$ 双相,亚

晶界处存在位错壁,位错主要集中在 α 相晶界处。

(3)力学性能方面,对接接头焊接试样的抗拉强度平均值为 981 MPa,略低于母材试样(1 028 MPa);对接接头焊接试样的断后伸长率平均值为 5.5%,远低于母材试样(15.0%)。对接接头硬度从焊缝中心到母材呈现高、低、高的变化趋势,焊缝区的硬度值大于母材的硬度值。低温冲击试验中,对接接头焊接试样的冲击功平均值为 19.51 J,明显低于母材试样(41.50 J),且不足母材试样的 50%。

(4)T形接头硬度从焊缝中心到母材,硬度呈现下降趋势,焊核区的硬度最高,热影响区次之。

参考文献

[1] 李秋泽,单巍,张英春,等. 中国高速动车组转向架技术发展及展望[J]. 机车电传动, 2023(2):14-35.

LI Q Z, SHAN W, ZHANG Y C, et al. Technological development and prospect of China's high speed EMU bogies [J]. Electric Drive for Locomotives, 2023(2):14-35.

[2] 冀相朝,么天元,胡文浩,等. 轨道客车转向架自动焊接技术应用现状及发展趋势[J]. 焊接技术, 2015, 44(12):1-4, 27.

JI X C, ME T Y, HU W H, et al. Application status quo and development of automatic welding technology to bogie of railway passenger cars[J]. Welding Technology, 2015, 44(12):1-4, 27.

[3] DINMORE N. Supporting innovation in bogie and wheelset development[J]. Global Railway Review, 2022(3):28.

[4] GUO F, WU S C, LIU J X, et al. Fatigue life assessment of bogie frames in high-speed railway vehicles considering gear meshing[J]. International Journal of Fatigue, 2020, 132:105353. 1-105353. 12.

[5] 张关梅,黄海广,张浩泽,等. 轧制温度对TA31钛合金热轧板材组织与性能的影响[J]. 塑性工程学报, 2022, 29(11):224-232.

ZHANG G M, HUANG H G, ZHANG H Z, et al. Effect of rolling temperature on microstructure and properties of TA31 titanium alloy hot rolled plate [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29(11):224-232.

[6] 胡生双,肖君,赵虎,等. 固溶冷却方式对TB15钛合金组织和力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2022, 47(10):4.

HU S S, XIAO J, ZHAO H, et al. Effect of solution cooling method on microstructure and mechanical properties of TB15 titanium alloy[J]. Heat Treatment of Metal, 2022, 47(10):4.

[7] 张宝,李德崇,曹宏东,等. 温度变化速率对TC4钛合金热变形力学性能的影响[J]. 材料与冶金学报, 2023, 22(5):495-499.

ZHANG B, LI D C, CAO H D, et al. Effect of temperature change rate on the mechanical properties of TC4 titanium alloy under hot deformation[J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2023, 22(5):495-499.

[8] 杨兴远,蔡雨升,姜沐池,等. 锻造变形对扩散连接TC4钛合金的影响[J]. 有色金属科学与工程, 2023, 14(4):527-535.

YANG X Y, CAI Y S, JIANG M C, et al. Influence of forging deformation on diffusion bonded TC4 titanium alloy [J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2023, 14(4):527-535.

[9] 张乐,刘莹莹,史晓楠,等. TC18钛合金的显微组织及拉伸性能[J]. 材料热处理学报, 2017, 38(6):54-60.

ZHANG L, LIU Y Y, SHI X N, et al. Microstructure and tensile properties of TC18 titanium alloy [J]. Transactions of

Materials and Heat Treatment, 2017, 38(6):54-60.

[10] 李军兆,孙清洁,于航,等. 薄板TC4钛合金TIG电弧和激光焊接接头晶粒尺寸与微观组织[J]. 焊接学报, 2022, 43(10):57-62, 70.

LI J Z, SUN Q J, YU H, et al. Grain size and microstructure of TIG arc and laser welded joints of thin TC4 titanium alloy [J]. Transactions of The China Welding Institution, 2022, 43(10):57-62, 70.

[11] KUMAR, PRAMOD, SINHA, AMAR NATH. Effect of heat input in pulsed Nd:YAG laser welding of titanium alloy (Ti6Al4V) on microstructure and mechanical properties [J]. Journal of neurosurgical sciences, 2019, 63(3):673-689.

[12] 牟刚,华学明,徐小波,等. 8 mm厚TC4钛合金TIG, MIG焊接工艺及性能对比研究[J]. 电焊机, 2020, 50(4):7.

MU G, HUA X M, XU X B, et al. Study on TIG and MIG welding processes and properties of 8 mm thick TC4 titanium alloy[J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(4):7.

[13] 陈今良,刘敏,张利民. TC4钛合金TIG焊接工艺及性能研究[J]. 四川冶金, 2021, 43(5):28-32.

CHEN J L, LIU M, ZHANG L M. Research on TIG welding process and performance of TC4 alloy [J]. Sichuan Metallurgy, 2021, 43(5):28-32.

[14] 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 K L, WANG T, ZHANG X Z, et al. Study on corrosion resistance of TC4 titanium alloy TIG joint for rail traffic [J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 36(3):37-41.

[15] 高晓刚,董俊慧,韩旭. TC4钛合金TIG焊接头组织对性能的影响[J]. 焊接, 2016(7):27-31, 69-70.

GAO X G, DONG J H, HAN X. Effect of microstructure on properties of TIG welded joint for TC4 titanium alloy [J]. Welding & Joining, 2016(7):27-31, 69-70.

[16] 方乃文,黄瑞生,谢吉林,等. 大厚度TC4钛合金超窄间隙激光填丝焊接头组织性能研究[J]. 电焊机, 2022, 52(6):25-34.

FANG N W, HUANG R S, XIE J L, et al. Study on the microstructure and properties of thick TC4 titanium alloy ultra narrow gap laser filled wire welding joint [J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(6):25-34.

[17] WANG S, WU X. Investigation on the microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy joints with electron beam welding [J]. Materials & design, 2012, 36:663-670.

[18] 石亚一,隋兴天. TC4钛合金焊接接头的组织和性能分析[J]. 焊接技术, 2017, 46(6):18-21.

SHI Y Y, SUI X T. Analysis of microstructure and properties of TC4 titanium alloy welded joints [J]. Welding Technology, 2017, 46(6):18-21.