

引用格式:高福洋,崔永杰,张浩,等.TC4钛合金T型接头双面双弧MIG焊接特性研究[J].热加工工艺,2024,53(11):26-30+36.

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20222287

http://www.rjggy.net rjggy@vip.163.com

TC4钛合金T型接头双面双弧MIG焊接特性研究

高福洋^{1,2}, 崔永杰¹, 张浩¹, 鄂楠^{1,2}, 边传新^{1,2}, 余巍^{1,2}

(1. 中国船舶集团有限公司第七二五研究所, 河南 洛阳 471023; 2. 先进钛及钛合金材料国家地方联合工程研究中心, 河南 洛阳 471039)

摘要:对30 mm厚TC4面板和15 mm厚TC4腹板构成的T型角焊缝采用双面双弧MIG方法进行焊接,采用高速摄影对熔滴过渡形态进行了观测,采用数值模拟方法对比了单侧焊接和双面双弧焊接的温度分布,并对双面双弧焊接的焊缝成形进行了观测,对焊接接头组织进行了分析,对接头显微硬度和拉伸性能进行了测试。结果表明:采用双面双弧MIG焊接可以获得成形良好内部无缺陷的焊接接头。焊接熔滴过渡形式为连续的滴状过渡,过渡过程稳定均匀。双侧焊接时,两侧温度场对称分布。接头冶金结合良好,焊缝组织为粗大的柱状晶,晶粒内部为长针状 α' 、层片状 α 和块状 α 相。面板侧热影响区为残余初生 α 、层片状 α 和残余 β 相。腹板侧热影响区为针状 α 、层片状 α 和残余 β 相。腹板和面板侧热影响区的显微硬度均高于母材。焊接接头抗拉强度达到969 MPa以上,断裂位置位于母材。

关键词:TC4钛合金; T型接头; 双面双弧MIG焊接; 焊缝成形; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG444⁺.74; TG146.23

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2024)11-0026-05

Study on Characteristics of Double-sided Double-arc MIG Welding of TC4 Titanium Alloy T-joint

GAO Fuyang^{1,2}, CUI Yongjie¹, ZHANG Hao¹, E Nan^{1,2}, BIAN Chuanxin^{1,2}, YU Wei^{1,2}

(1. Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471023, China; 2. National Local Joint Engineering Research Center for Advanced Titanium and Titanium Alloy Materials, Luoyang 471039, China)

Abstract: The T-shaped fillet weld composed of 30 mm thick TC4 panel and 15 mm thick TC4 web was welded by double-sided double-arc MIG method. The droplet transition morphology was observed by high-speed photography, the temperature distribution of single-sided welding and double-sided double-arc welding was compared by numerical simulation, the weld formation after double-sided double-arc welding was observed, the microstructure characteristics of the welded joint were analyzed, the microhardness and the tensile properties of the joint were tested. The results show that the welded joint with good shape and no internal defects can be obtained by double-sided double-arc MIG welding. The welding droplet transition form is a continuous droplet transition, and the transition process is stable and uniform. When welding at both sides, the welding temperature field of both sides is symmetrically distributed. The metallurgical bonding of the joint is good, the weld zone is coarse columnar crystal, and the interior structure of the grains is long needle α' , lamellar α and block α . The heat affected zone at the panel side is residual primary α , lamellar α and residual β . The heat affected zone at the web side is needle shaped α , lamellar α and residual β . The microhardness of the heat affected zone at the web and panel sides is higher than that of the base metal. The tensile strength of the joint reaches more than 969 MPa, and the fracture position is located at the base metal.

Key words: TC4 titanium alloy; T-joint; double-sided double-arc MIG welding; weld forming; microstructure; mechanical property

钛及钛合金因高比强度、比刚度和耐腐蚀性而被广泛应用于各种工业领域^[1],是继钢铁、铝之后的

又一重要结构材料,被誉为“第三金属”“太空金属”和“海洋金属”^[2-3]。钛及钛合金作为先进海洋工程装备的重要结构材料,被广泛应用于海洋油气开采、载人潜水器、海洋船舶等领域。为了提高钛及钛合金结构的刚性,大量采用了T型接头设计,较为常见的制备方法有TIG、电子束、激光和搅拌摩擦焊等焊接技术^[4-7]。

收稿日期:2022-08-19

基金项目:郑洛新自创区专项资助项目(201200211400)

作者简介:高福洋,男,河南洛阳人,高级工程师,主要研究方向:钛合金焊接技术;E-mail:gaofuyang@126.com

技术^[4-7]。双面双弧 MIG 焊接方法是在 T 型接头腹板两侧各采用一把独立电源的焊枪,同时同向焊接的一种焊接方法,相比于其他焊接方法,具有焊接效率高、熔深大、焊接角变形小等诸多显著优点,非常适用于 T 型结构的焊接。国内外对于钛合金的 MIG 焊接研究较少,主要是焊接工艺探索^[8-9],消除焊接缺陷,提高接头性能。关于双面双弧焊接技术的研究主要集中在合金钢、铝及铝合金等材料上,对于钛及钛合金的双面双弧 MIG 焊接尚未见到研究报道。我们首次将双面双弧熔化极惰性气体保护焊应用到钛合金 T 形接头的焊接上,以大幅度提高焊接效率,减小变形。采用高速摄影对熔滴过渡进行观测,掌握良好成形时的熔滴过渡形式,同时对接头组织和性能进行研究,掌握接头组织变化规律,为后续双面双弧 MIG 焊接技术在钛合金 T 型结构焊接上的工程化应用奠定基础。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

采用 TC4 板材为研究对象,其中,腹板为 15 mm×100 mm×400 mm 板材,面板为 30 mm×100 mm×400 mm 板材。焊接采用 $\phi 1.2$ mm 的 TC3 焊丝,板材和焊丝的化学成分见表 1,板材的力学性能见表 2。

表 1 TC4 板材和 TC3 焊丝的化学成分(质量分数,%)
Tab.1 Chemical composition of TC4 plate and TC3 welding wire (wt%)

材料	Al	V	Fe	N	H	O	Ti
TC4	6.06	3.92	0.11	0.014	0.0014	0.15	余量
TC3	5.31	3.99	0.026	0.009	0.013	0.055	余量

表 2 TC4 板材的力学性能
Tab.2 Mechanical properties of TC4 plates

厚度/mm	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A(%)	断面收缩率 Z(%)
15	923	854	14	29
30	910	840	14	30

两种厚度的 TC4 板材均为退火态,板材的显微组织如图 1 所示。板材组织为由初生等轴 α 和含有针状 α 相的 β 转变相组成的双态组织。

1.2 试验方法

钛合金 T 型接头双面双弧 MIG 焊接过程如图 2 所示。在 T 型接头腹板两侧各采用一把独立电源的福尼斯焊枪,同时同向进行焊接。

焊前对待焊接的试板进行酸洗,去除表面油污

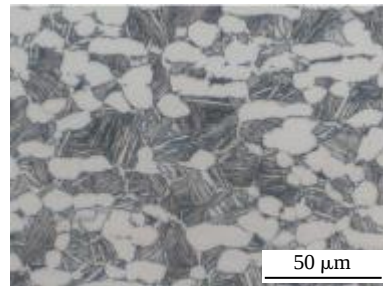


图 1 TC4 板材的显微组织
Fig.1 Microstructure of TC4 plate

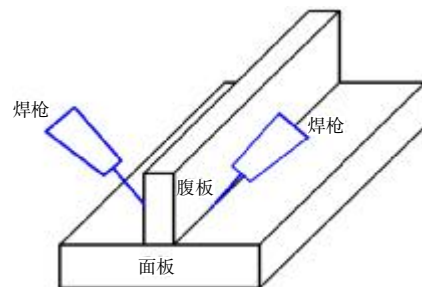


图 2 焊接过程示意图
Fig.2 Schematic diagram of welding process

和氧化膜,焊接时对待焊接坡口面进行机械打磨,然后用无水乙醇擦洗干净,点焊之后开始焊接。焊接工艺参数见表 3。

表 3 焊接工艺参数
Tab.3 Welding process parameters

焊接电流 /A	焊接电压 /V	送丝速度 / (m·min ⁻¹)	焊接速度 / (mm·min ⁻¹)
160~320	24~26	5~7	150~160

熔滴过渡采用 Acuteye 高速图像系统进行高速摄影观测,其主要由高速相机、加固型便携式工控机、专用光源、光学镜头组成。焊接完成后,对焊缝成形情况进行仔细观察,未发现裂纹和咬边等焊接缺陷,焊接成形良好。对该焊接接头进行 100%超声和渗透检测,结果显示接头无裂纹、气孔、未熔合等缺陷,符合 NB/T 47013 的探伤 I 级合格标准。

焊后对接头进行金相测试。金相试样沿垂直于焊缝方向取样,经 Keller 试剂腐蚀后,在 OLYMPUS GX71 金相显微镜下做金相观察。根据 GB/T 13298—1991《金属显微组织检验方法》标准制备金相试样,利用光学显微镜进行微观组织观察和分析。显微硬度测试根据 GB/T 4340.1—2009《金属材料维氏硬度试验第 1 部分:试验方法》标准进行,在 VMH-I04 显微硬度计上进行显微硬度测试,测量载荷 1.96 N,加载时间 10 s。拉伸试样采用十字形焊透结构,如图 3 所示。机加工去除多余面板,试样长度

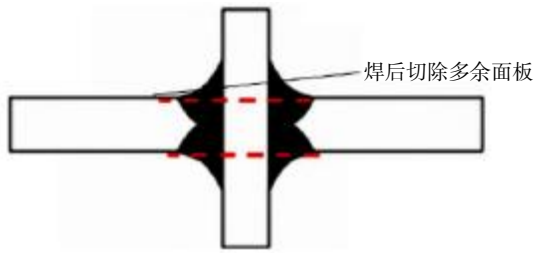


图3 十字形焊透结构
Fig.3 Cross type penetration welding structure

500 mm, 宽度 28 mm, 按照 GB/T 2651—2008《焊接接头拉伸试验方法》进行拉伸试验, 测试温度 20℃。

2 试验结果及讨论

2.1 熔滴过渡对焊缝成形的影响

对焊接过程中的熔滴过渡形式进行观测, 如图4所示。熔滴过渡形式为射滴过渡, 熔滴过渡平稳, 没有飞溅等缺陷的产生。电弧稳定, 没有显著的漂移现象。熔滴的脱离是作用于其上的力和惯性动量联合作用的结果。焊接过程中需要对焊接弧长进行修正, 避免弧长偏移过大造成焊接过程的不稳定影响熔滴过渡, 产生飞溅和气孔等焊接缺陷, 进而导致接头成形和力学性能降低。

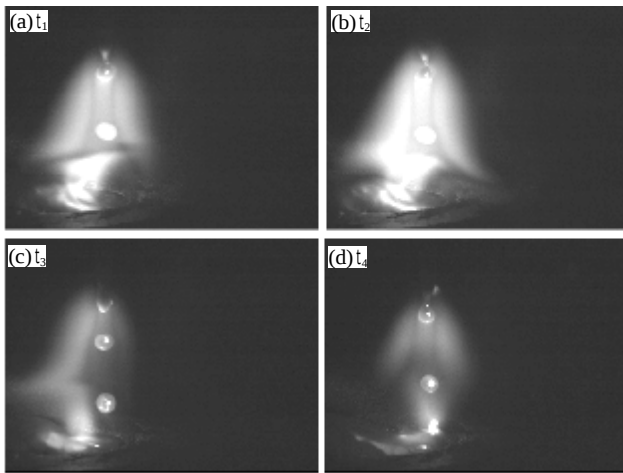


图4 焊接熔滴过渡图
Fig.4 Welding droplet transfer images

焊接时电弧状态主要受弧长修正系数和脉冲修正系数两大因素影响。其中弧长主要影响焊接过程中熔滴过渡时的电弧吹力和电弧的稳定性。当电弧过短时, 熔滴射流或者射滴过渡时的电弧吹力较大, 造成电弧不稳定; 当电弧过长时, 电弧位置容易发生漂移, 同时熔滴自旋轨迹较长, 熔滴过渡时容易产生小熔滴, 导致飞溅增加, 而且熔池扰动也会增大气孔

产生的倾向。因此在双面双弧焊接过程中需要保证良好的熔滴过渡。

T型角焊缝焊接温度场如图5所示。从图中可以发现, 单侧焊接时由于为一侧加热, 加热侧焊接温度较高, 非加热侧温度较低, 从而造成焊接角变形, 影响T型接头的焊后尺寸精度; 双侧焊接时, T型接头两侧对称受到焊接热循环作用, 焊接温度场对称分布, 一方面可以抵消腹板的角变形, 从而保证T型角焊缝的尺寸精度, 另一方面双面双弧焊接温度场的均匀性和对称性要好于先后在T型接头两侧进行单道焊接温度场的叠加效果, 两侧组织形貌和性能一致性更好。

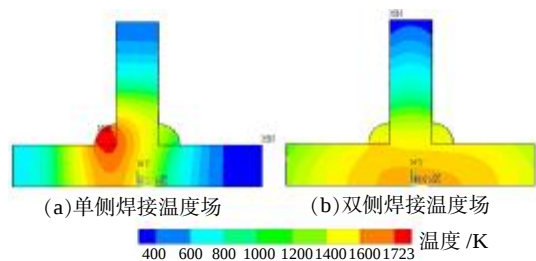


图5 T型角焊缝的焊接温度场
Fig.5 Welding temperature field of T type welds

接头宏观形貌和角焊缝表面成形形貌如图6所示。在严格氩气保护条件下, 双面双弧角焊缝呈银白色, 焊缝表面没有肉眼可见的裂纹、孔洞和夹杂等缺陷, 焊接鱼鳞纹均匀、细腻。焊缝正面熔宽为10 mm左右。按照无损检测标准 NB47013 进行渗透和X射线检测, 未发现缺陷, 达到I级合格要求。



(a)接头宏观形貌 (b)角焊缝表面形貌

图6 焊后试板表面形貌
Fig.6 Surface morphologies of postweld plate

2.2 双面双弧 MIG 焊接接头组织

图7为焊接接头横截面形貌。从图中可以发现, T型角焊缝冶金结合良好, 没有发现明显的气孔、裂纹、夹杂等焊接缺陷。T型接头沿腹板中心线对称分布。焊缝为典型的铸造组织, 由粗大的柱状晶和少量等轴晶组成。在熔池凝固过程中, 柱状晶在熔合线处与母材未熔化的晶粒联生结晶, 在温度梯度的作用

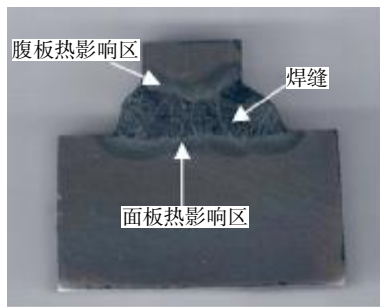


图7 接头横截面形貌

Fig.7 Morphology of cross section of the joint

下向焊缝中心生长。T型接头根据焊接过程中经历的焊接热循环作用的不同可以分为焊缝和热影响区。热影响区根据所处的位置不同可以分为腹板热影响区和面板热影响区。

焊缝区组织形貌如图8(a)、(b)所示。焊缝位置为粗大的柱状晶,晶粒宽度大于 $300\mu\text{m}$,长度大于 $600\mu\text{m}$ 。柱状晶晶界存在 α 相,晶粒内部为针状和块状组织的混合组织,如图8(a)所示。进一步观测柱状晶内部组织形貌,可以发现晶粒内部存在大量长针状 α' 、层片状 α 和块状 α 组织,如图8(b)所示,其中块状 α 组织占到50%左右,长针状 α' 含量和层片状 α 含量相当。这与双面双弧焊接热循环特征有关,双面双弧MIG焊接热输入量较大,使得熔化金属液态高温停留时间长,凝固过程中柱状晶有足够的时间和能量长大,从而形成粗大柱状晶;同时腹板散热条件有限,焊缝的冷却速度较慢,使得焊缝中过

饱和固溶体的过冷度不足,没有足够的能量进行切边相变,相转变过程中发生较多的合金元素扩散,从而形成较大数量的 α 相。而高温停留时间的增长和冷却速度的降低,促进了 α 相的长大,形成了块状形貌。

面板热影响区的组织形貌如图8(c)、(d)所示。面板侧热影响区经过双面双弧热循环作用,加热温度达到相变温度以上,由于相变点以上温度停留时间短,初生 α 相没有完全转变为 β 相,存在较多数量的初生 α 相,如图8(c)所示。在冷却过程中转变 β 相发生相变生成层片状 α 相。相比于原始母材,面板侧热影响区中的等轴 α 相含量降低,层片状 α 相含量提升,如图8(d)所示。这对提升热影响区强度和断裂韧性具有积极的作用。

腹板热影响区的组织形貌如图8(e)、(f)所示。腹板侧热影响区由于腹板本身厚度薄于面板,受到焊接热作用后的散热条件较差,在双面双弧的作用下,腹板位置的热积累要高于面板;同时不良的散热条件使得高温停留时间增长。因此相对于面板,腹板侧热影响区经过双面双弧热循环作用,加热温度达到相变温度以上。而且在相变点以上温度停留时间会更长,初生 α 相转变为 β 相的数量更多,最终导致大块的初生 α 相转变为厚层片状 α 相。大块初生 α 相基本转变殆尽,转变 β 晶粒在后续的冷却过程中转变为针状 α 和残余 β 相,针状 α 相占据主要地

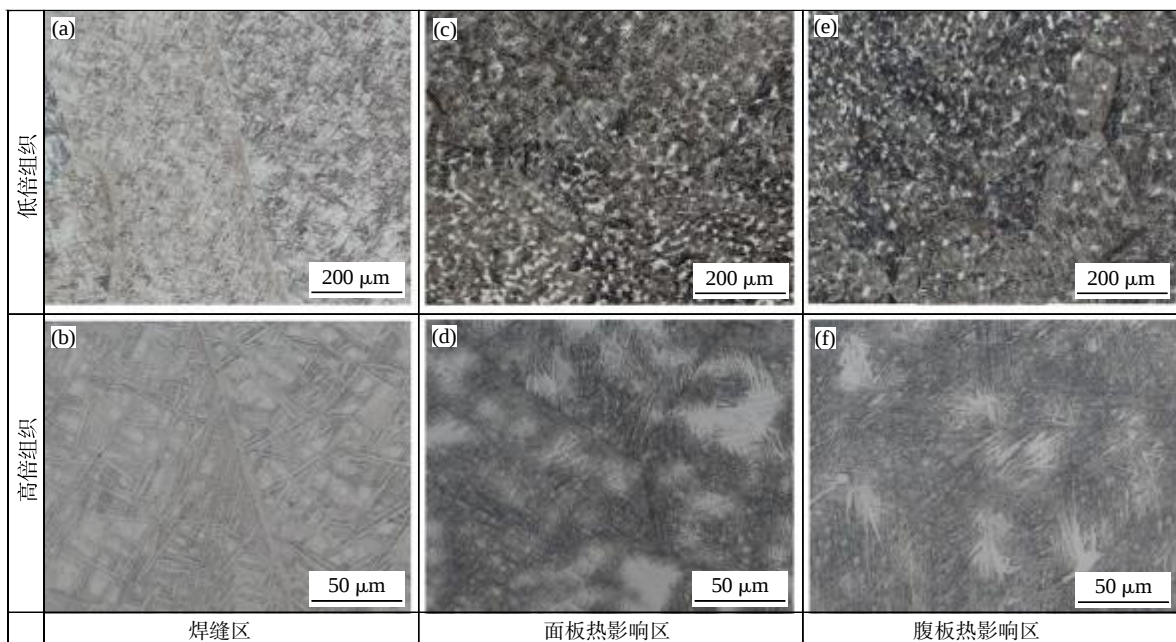


图8 接头各区域的显微组织

Fig.8 Microstructure of each region of the welded joint

位,如图 8(f)所示。

2.3 双面双弧 MIG 焊接接头显微硬度

接头各区域显微硬度分布如图 9 所示。可以发现焊缝显微硬度平均值在 290HV0.2 左右,低于母材的 310HV0.2,而腹板和面板侧热影响区的显微硬度均高于母材。其中腹板侧热影响区的显微硬度稍高于面板侧热影响区,平均值高出 10HV0.2。由于采用的是 TC3 焊丝,焊缝金属本身合金元素含量相对于 TC4 有所降低,焊接过程中合金元素发生烧损,而且在双面双弧 MIG 焊接大热输入条件下,焊缝中的马氏体含量降低,片层厚度随冷却速度的降低而得到增大,从而降低了强度。腹板侧热影响区由于腹板本身厚度薄于面板,在双面双弧的作用下腹板位置的热积累要高于面板,散热条件差,使得腹板位置的初生 α 含量降低,因此显微硬度会略高于面板侧热影响区。

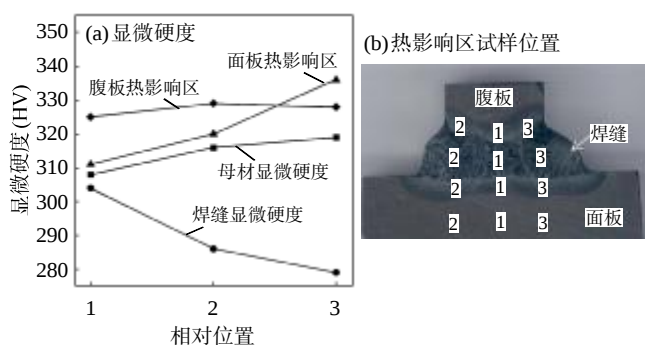


图 9 接头各区域的显微硬度
Fig.9 Microhardness of each area of the joint

2.4 双面双弧 MIG 焊接接头力学性能

从制备的十字形焊透结构上取 2 件拉伸试样,进行拉伸试验,抗拉强度分别为 969、984MPa,断裂位置位于母材。焊接接头拉伸应力-应变曲线如图 10 所示。接头表现出了良好的抗拉性能和变形性能。这是由于焊缝主要为针状和块状 α 相,可以在

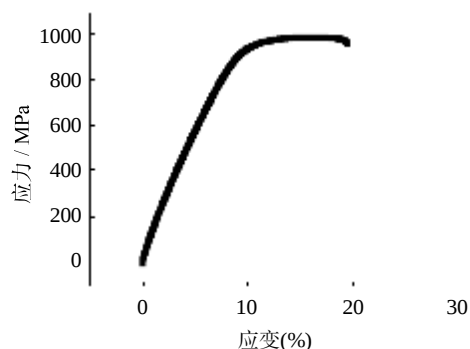


图 10 焊接接头的拉伸应力-应变曲线
Fig.10 Tensile stress-strain curve of the welded joint

细晶强化的基础上保证其具有良好的塑性变形能力。同时少量的 α' 相在提升强度的同时不会大幅降低焊接接头的变形能力。热影响区通过细针状 α 相提升了接头的强度,同时晶粒相对于粗大的等轴 α 相得到了细化,提升了热影响区的塑性变形能力。而母材为等轴 α 相和 β 转变相组成的混合组织,容易在界面处形成应力集中,成为拉伸试验的薄弱环节,首先从母材区域发生断裂。

3 结论

(1) 采用双面双弧 MIG 焊接可以获得成形良好内部无缺陷的焊接接头。焊接熔滴过渡形式为连续的滴状过渡,过渡过程稳定均匀。

(2) 通过模拟对比单侧和双面双弧焊接温度场,发现双侧焊接时温度场对称分布,一方面可以抵消腹板的角变形,同时,两侧组织形貌和性能一致性更好。

(3) 接头冶金结合良好,焊缝为粗大的柱状晶,晶粒内部为长针状 α' 、层片状 α 和块状 α 组织。面板侧热影响区为残余初生 α 、层片状 α 和残余 β 相。腹板侧热影响区为针状 α 、层片状 α 和残余 β 相。

(4) 焊缝显微硬度平均值在 290 HV0.2 左右,低于母材的 310HV0.2,而腹板和面板侧热影响区的显微硬度均高于母材。其中腹板侧热影响区的显微硬度稍高于面板侧热影响区。焊接接头抗拉强度达到 969MPa 以上,断裂位置位于母材。

参考文献:

- [1] Boyer R R. An overview on the use of titanium in the aerospace industry [J]. Materials Science & Engineering A, 1996, 213: 103-114.
- [2] 张翥. 钛的金属学和热处理[M]. 北京:冶金出版社, 2009.
- [3] 杨英丽, 苏航标, 郭荻子, 等. 我国舰船钛合金的研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(S1): 1002-1007.
- [4] Xiong J, Li S, Gao F, et al. Microstructure and mechanical properties of Ti6321 alloy welded joint by GTAW[J]. Materials Science & Engineering A, 2015, 640: 419-423.
- [5] James Ault, James Pillers, Stewart Veeck. The GTAW of Ti-6Al-4V castings and its effect on microstructural and mechanical properties[J]. JOM, 2005, 11: 62-65.
- [6] Gao F, Yu W, Song D, et al. Fracture toughness of TA31 titanium alloy joints welded by electron beam welding under constrained condition [J]. Materials Science & Engineering A, 2020, 772: 138612.

(下转第 36 页)

- [2] 陈宇豪, 薛松柏, 王博, 等. 汽车轻量化焊接技术发展现状与未来[J]. 材料导报, 2019, 33(S2):431-440.
- [3] 李永兵, 马运五, 楼铭, 等. 轻量化多材料汽车车身连接技术进展[J]. 机械工程学报, 2016, 52(24):1-23.
- [4] 高辰恺, 杨瑾, 李铸国, 等. 铝钢异种金属先进连接方法研究进展焊接[J]. 焊接, 2021(11):7-20.
- [5] Cao X L, Wang G, Xing C, et al. Effect of process parameters on microstructure and properties of laser welded joints of aluminum/steel with Ni/Cu interlayer[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31 (8): 2277-2286.
- [6] Reza-E-Rabby M, Ross K, Overman N R, et al. Joining thick section aluminum to steel with suppressed FeAl intermetallic formation via friction stir dovetailing [J]. Scripta Materialia, 2018, 148:63-67.
- [7] Zhang C, Wang S, Luo D, et al. Study of the mechanical properties and microstructures of conical joints for aluminum/steel continuous drive friction welding [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 67(8):241-252.
- [8] Yang T, Dai W, Zhuang Y, et al. Investigation on the control of interfacial layer uniformity in laser-metal inert-gas hybrid welded-brazed Al/steel butt joint [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 58(9):1241-1250.
- [9] Cao X, Yi Z, Xu C, et al. Study on laser/DP-MIG hybrid welding-brazing of aluminum to Al-Si coated boron steel [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 64:333-340.
- [10] Wu K, Yuan X, Li T, et al. Effect of ultrasonic vibration on TIG welding-brazing joining of aluminum alloy to steel [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 266: 20-238.
- [11] 邓枫昱, 檀财旺, 孟圣昊, 等. DP590 双相钢 /6061 铝合金激光熔钎焊工艺特性研究[J]. 电焊机, 2017, 47(9):12-17.
- [12] 袁锐, 邓胜杰, 崔海超, 等. 铝-钢异质金属双光束激光焊接 IMC 层迁移行为及对界面性能的影响 [J]. 机械工程学报, 2020, 56(6):33-40.
- [13] 周帖武, 姜德福, 刘金水, 等. 铝 / 钢表面预置粉末激光焊接头的组织与性能 [J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(5): 62-73.
- [14] 周帖武, 刘金水, 卢源志, 等. 添加 Si 粉激光深熔焊钢 / 铝接头的显微组织与性能 [J]. 机械工程学报, 2018, 54(14): 58-65.
- [15] 袁江, 周帖武, 陈胜迁, 等. 钢铝添加粉末激光焊接头界面组织与性能[J]. 材料工程, 2017, 45(9):123-128.
- [16] 祁小勇, 周京, 刘硕夫, 等. 5083 铝合金摆动激光电弧复合焊工艺研究[J]. 航空制造技术, 2019, 62(6):71-78.
- [17] 王建. 铝 / 钢异种金属 CMT 熔-钎焊工艺性能研究[D]. 武汉:武汉纺织大学, 2018. [1]

(上接第 25 页)

- [17] Jiang Z G, Chen X, Li H, et al. Grain refinement and laser energy distribution during laser oscillating welding of Invar alloy[J]. Materials and Design, 2018, 186:108195.
- [18] Li J Z, Sun Q J, Liu Y B, et al. Melt flow and microstructural characteristics in beam oscillation superimposed laser welding of 304 stainless steel [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 50:629-637.
- [19] Hagenlocher C, Sommer M, Fetzter F, et al. Optimization of the solidification conditions by means of beam oscillation during laser beam welding of aluminum [J]. Materials and Design, 2018, 160:1178-1185.
- [20] Schultz V, Seefeld T, Vollertsen F. Gap bridging ability in laser beam welding of thin aluminum sheets [J]. Physics Procedia, 2014, 56:545-553. [2]

(上接第 30 页)

- [7] Gao F, Gao Q, Jiang P, et al. Fine microstructure of electron beam welding joint in fusion zone of large thickness titanium alloy [J]. Scientia Sinica Technologica, 2017, 47(9):941-945.
- [8] 张龙, 陈东高, 张迎迎, 等. 低成本 TC4 钛合金单丝 MIG 焊工艺与性能研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2021, 44(1):93-96.
- [9] 刘守义, 王有君, 耿涛. 钛合金 MIG 焊接头组织性能[J]. 大连交通大学学报, 2018, 39(3):86-88. [3]