

钛合金激光-GTAW 复合焊接研究进展

符成学, 徐家磊, 雷小伟, 马照伟, 刘 甲, 付占波

(中国船舶集团公司第七二五研究所, 河南 洛阳 471023)

摘 要:综述了激光-GTAW 复合焊接技术的原理、特点、分类以及其在钛合金焊接领域的研究进展。按照热源空间分布类型和热源类型对激光-GTAW 复合热源进行了分类, 阐述了钛合金激光-GTAW 复合焊接技术的研究进展, 并展望了钛合金激光-GTAW 复合焊接技术的发展方向。

关键词:激光-GTAW 复合; 钛合金焊接; 研究进展

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20212335

中图分类号: TG456.7; TG444+.74

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2022)09-0013-05

Research Progress of Laser-GTAW Hybrid Welding Technology in Titanium Alloy

FU Chengxue, XU Jialei, LEI Xiaowei, MA Zhaowei, LIU Jia, FU Zhanbo

(Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471023, China)

Abstract: The principle, characteristics, classification of laser-GTAW hybrid welding technology and its research progress in titanium alloy were reviewed. The laser-arc hybrid welding technology was classified according to the type and spatial distribution of heat source. The research progress of laser-GTAW hybrid welding in titanium alloy was elaborated. The development direction of titanium alloy laser-GTAW hybrid welding technology was prospected.

Key words: laser-GTAW hybrid welding; titanium alloy welding; research progress

钛及钛合金具有比强度高、耐腐蚀性好、无低温脆转变、良好的力学性能等特点, 被广泛应用于航空航天、船舶海工、交通运输以及生物医疗等领域^[1-3]。相关报道表明, 航空航天领域的钛用量占整个钛产业产量的 70%, 美国的 SR-72 侦察机为满足高空高速的要求, 钛合金用量达到整个飞机重量的 91%^[4-5]。在舰船制造领域, 美国和俄罗斯等军事强国均建造有全钛潜艇和快艇等高性能武器^[6]。然而, 由于钛及钛合金 400℃ 以上吸收氮、氢、氧的特殊性质, 对其焊接技术提出了更高的要求^[7]。

激光-电弧复合焊技术是一种将物理属性和热量空间分布均不相同的激光和电弧两种热源复合在一起进行焊接的一种新型焊接技术, 兼具了激光焊能量密度高、穿透能力强和电弧焊接头成形好, 装配要求低的优点。激光-电弧复合焊热源分为激光-GTAW 复合和激光-GMAW 复合两种, 其中激光-GTAW 复合焊热源焊接过程稳定, 焊缝质量较高,

适合于铝、镁、钛等有色金属的焊接^[8]。本文总结了钛合金激光-GTAW 复合焊接技术的研究现状, 展望了钛合金激光-GTAW 复合焊接技术的发展方向, 以期推动钛合金激光-GTAW 复合焊接技术的工程化应用。

1 激光-GTAW 复合焊原理及分类

虽然激光焊的能量密度较高, 焊接质量好, 但对工件装配要求苛刻, 适应性较差, 限制了其应用和发展。英国伦敦帝国大学的 Steen 等^[9]在二十世纪八十年代首次将物理属性和热空间分布模式均不相同的激光和 GTAW 电弧复合在一起, 在保证接头大熔深和高质量的同时, 提高了接头适应性, 拓宽了焊接工艺窗口, 同时又大幅度提高了激光吸收率, 获得了一种全新高效的焊接热源。

1.1 激光-GTAW 复合焊原理

激光-GTAW 复合焊原理^[10]见图 1, 激光等离子体与 GTAW 电弧等离子体之间的相互作用, 产生了“1+1>2”的协同效应。GTAW 电弧的加热作用提高了工件对激光的吸收率, 激光的引入对 GTAW 电弧起到一定的稳定和诱导增强作用, 激光等离子体和电弧等离子体的相互吸引使 GTAW 电弧得到压缩^[10-11]。

收稿日期: 2021-08-31

作者简介: 符成学(1993-), 男, 河南南阳人, 助理工程师, 硕士, 从事有色金属激光焊接研究; 电话: 18042678901;

E-mail: chengxue725@163.com

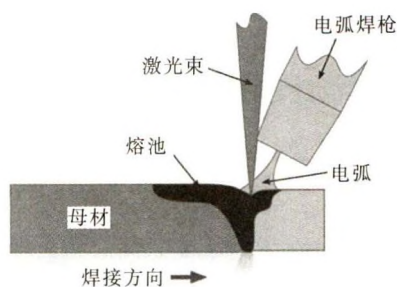


图1 激光-电弧复合焊接技术原理图^[10]
Fig.1 Schematic of laser-arc hybrid welding technology^[10]

激光-GTAW复合焊在实际中的应用具有以下优点^[12]:

(1) 由于激光的引入,焊缝的组织得到了有效改善,焊道的气孔率和裂纹等缺陷明显减少。

(2) 由于GTAW电弧的存在,焊道的桥接性更好,对装配的精度要求变低,同时焊接工艺窗口拓宽,工件对激光的吸收率得以提高。

(3) 激光与GTAW电弧的相互作用增大了两者的协同作用,提升了焊接速度、降低了焊接热输入、提高了焊接稳定性。

因此,激光-GTAW复合焊接技术成为国内外各研究机构关注的焦点。

1.2 激光-GTAW电弧复合焊分类

激光-GTAW电弧复合热源根据热源空间分布类型和热源类型有多种分类方式。

根据激光与GTAW电弧的空间分布位置不同,激光-GTAW复合热源可分为旁轴复合模式和同轴复合模式两种^[13],如图2所示。旁轴复合时,热源分布状态对焊接方向较为敏感,主要适用于被焊零件结构简单,路径基本固定的长直焊缝^[14]。同轴复合时,热源能量密度以激光束轴线(或电弧轴线)为中心呈环绕对称分布,主要适用于结构复杂、路径多变工件的焊接,以及复杂结构件的增材制造。

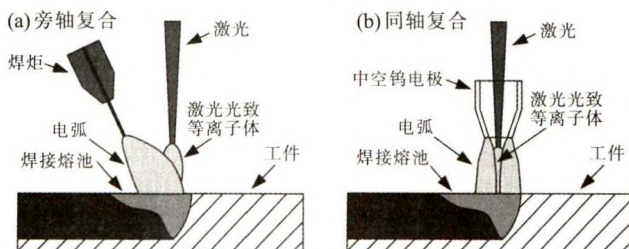


图2 激光-电弧复合模式示意图^[13]
Fig.2 Schematic diagrams of laser-arc hybrid mode^[13]

通常将1kW作为激光大功率和小功率的分界线,而激光的工作模式分为连续型和脉冲型。因此,

按照激光的类型,激光-电弧复合热源可分为四种:大功率连续激光-电弧复合、大功率脉冲激光-电弧复合、小功率连续激光-电弧复合和小功率脉冲激光-电弧复合^[12]。四种形式热源的能量分布和调节性各具特点,所适用的领域也各不相同。

按照GTAW电弧的类型,复合热源可以分为激光-普通GTAW电弧复合和激光-等离子弧复合。其中,激光与普通GTAW电弧复合技术最成熟,成本较低、应用最广泛;由于等离子弧的指向性强,激光-等离子弧复合热源稳定性好、效率高。

2 钛合金激光-GTAW复合焊接

随着钛合金冶炼技术的成熟,钛合金在工程中的需求量日益增加。激光-GTAW复合热源焊接稳定性好,适用于钛及其合金的高效高质量焊接。研究钛合金激光-GTAW复合焊接技术具有较强的前瞻性和实用性。

2.1 传热研究进展

Xu等^[15]采用了新型 $\text{SiO}_2\text{-TC4-SiO}_2$ “三明治”结构的能量分析方法,对钛合金激光-GTAW复合焊接过程中热源间距对“匙孔”中能量传递行为的影响进行了研究。结果表明,“匙孔”中的能量传递形式包括底部吸收和侧壁吸收两种模式。热源间距对复合热源的耦合状态、“匙孔”壁角度和能量传递模式等有着明显的影响,当热源间距原弧柱长度相等时,“匙孔”中能量传递以底部吸收为主,热源耦合状态较好,“匙孔”壁倾斜角较小。图3为“匙孔”中的能量传递示意图^[15]。可以看出,“匙孔”壁倾斜角越小,能量传递越倾向于底部吸收模式,能量传递的效率越高。

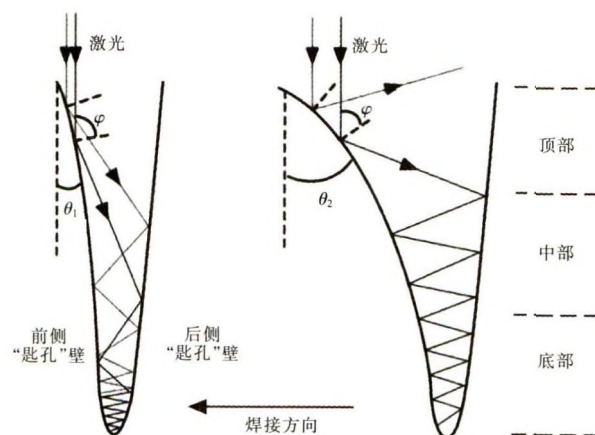


图3 “匙孔”中的能量传递示意图^[15]
Fig.3 Schematic of energy transfer in keyhole^[15]

赵宇宏等人^[16]采用高斯曲面体热源模拟激光作用,采用双椭球热源模拟 GTAW 电弧作用,建立了激光-GTAW 复合热源的模型,对 3 mm 厚 TC4 钛合金板材的 GTAW 焊、激光焊和激光-GTAW 复合焊的温度场和应力场进行模拟仿真。结果表明使用该组合热源模型得到的计算结果和试验结果相符,该模型适用于钛合金激光-GTAW 复合热源。

目前,各研究机构对黑色金属、铝合金和镁合金激光-GTAW 复合焊接的传热机制进行了研究,但针对热物理性能特殊,焊接过程特殊,有特殊保护需求的钛合金激光-GTAW 复合焊传热机制研究

较少。

2.2 工艺性能研究进展

杨林波^[17]研究了 TA15 合金激光-GTAW 复合焊过程中,热源布置模式和保护工艺对焊缝成形和接头性能的影响。结果表明,电弧在前时,复合热源的穿透能力更强,而激光在前时焊接过程更稳定,焊缝成型更好,更容易实现保护。图 4 为不同保护时间下 GTAW 和复合焊的接头表面形貌。可以看出,相同的保护时间下,激光-GTAW 复合焊的焊缝保护效果更好;与 GTAW 相比,复合焊接头的宽度更窄,焊缝鱼鳞纹更明显。

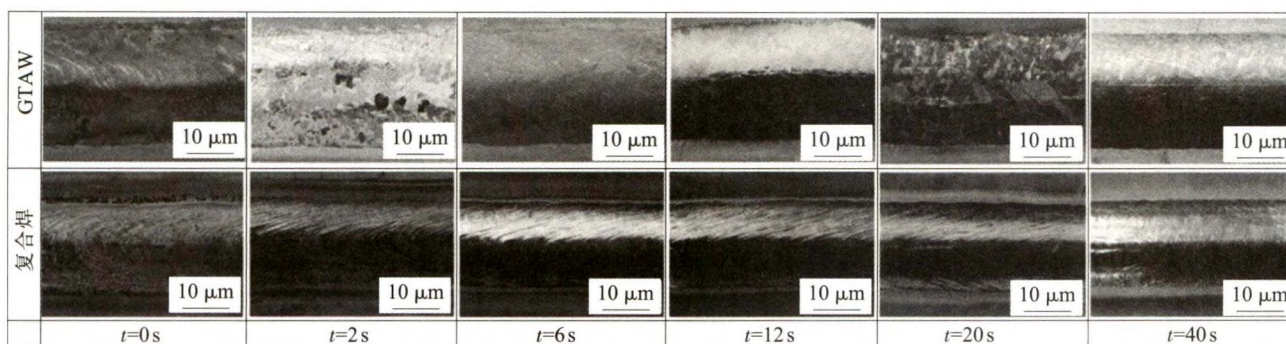


图 4 不同保护时间下接头的表面形貌^[17]

Fig.4 Surface morphologies of joints under different protection times^[17]

史吉鹏^[11]和李陈宾^[12]采用低功率脉冲激光诱导 GTAW 电弧复合焊接技术,进行薄板钛合金对接和 T 型结构的高效焊接。研究表明:脉冲激光、金属蒸汽和等离子体喷射对熔池都起到了搅拌的作用;与 GTAW 电弧相比,激光诱导 GTAW 复合热源稳定性更好,焊接速度更快,焊接工艺窗口更宽,接头质量更高。图 5 给出了 GTAW 和激光 GTAW 电弧复合焊的接头形貌对比,可以看出复合焊接头熔深更大,焊缝和热影响区更窄,晶粒更细小。

王敏等^[18]研究了钛合金激光-电弧复合焊 T 型接头的形貌和性能。结果表明:激光-电弧复合焊在接头微观组织、焊缝成形、生产效率及间隙适应性等方面较 GTAW 焊均有较大优势,且接头热影响区晶粒长大倾向小,疲劳性能优异。图 6 给出了两种方法的焊缝形貌对比。

刘晓寒等^[19]对 2.5 mm 厚 TA15 钛合金激光-GTAW 复合热源对接结构件的疲劳性能进行研究,发现与 GTAW 焊相比,复合焊接头中的片状 α 相明显增加,在疲劳试验过程中可以产生更多的次生裂纹以消耗断裂所需的能量。因此,接头的疲劳性能明显提高,达到母材的 90% 以上。

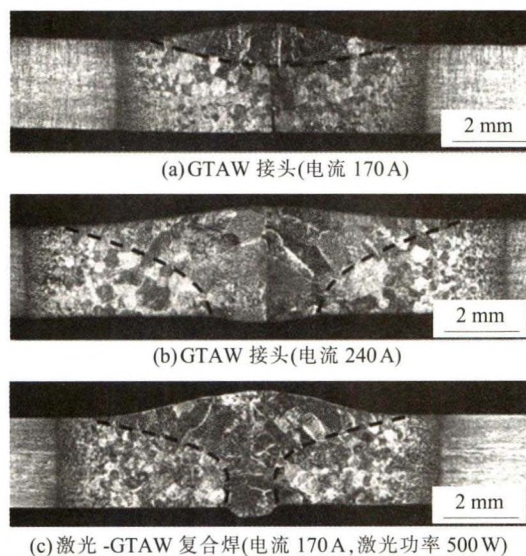
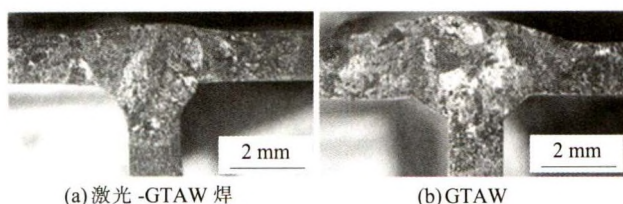


图 5 不同焊接方法下接头横截面形貌^[11]

Fig.5 Cross-section morphologies of joints under different welding methods^[11]

熊俊等^[20]研究了中厚度 TC4 合金激光-GTAW 复合焊接工艺,探究了焊接参数对焊缝组织和力学性能的影响。结果表明,由于 GTAW 电弧对焊接及母材的辅助加热作用,焊缝成形更美观,接头缺陷更少;焊接接头的抗拉强度、抗弯强度和硬度均高于母材;减小热输入可提高接头的拉伸性能,但对抗弯强



(a)激光-GTAW 焊

(b)GTAW

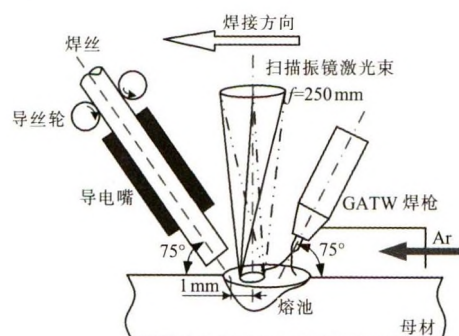
图6 不同焊接方法下T型接头截面形貌^[23]Fig.6 Cross-section morphologies of T joints under different welding methods^[23]

度影响较小。

综上所述,与GTAW焊相比,激光-GTAW复合焊由于激光的引入,有效地改善了接头的力学性能。但这些研究多针对航空航天领域的钛合金薄板进行,关于钛合金中厚板激光-GTAW复合焊接技术的研究较少。

2.3 新技术研究进展

许飞等^[21]采用振镜激光-GTAW复合焊接技术对6mm厚TC4钛合金进行拼焊试验,研究焊接工艺参数对焊缝成形的影响。其焊接原理图如图7所示。研究表明,扫描振镜激光可以改善焊缝成形,提高侧壁熔合能力,并改善接头的咬边缺陷;在复合焊接的过程中,GTAW电弧能量主要影响焊缝熔宽,而扫描激光能量主要影响熔深。

图7 振镜激光-GTAW复合焊接过程示意图^[21]Fig.7 Sketch of scanning galvanometer laser-GTAW hybrid welding process^[21]

姚伟等^[22]采用激光-等离子弧复合焊接技术焊接2.5mm厚的BT20(Ti-6.5Al-2Zr-1Mo-1V)钛合金板材,研究了工艺参数对焊缝成型的影响。结果表明:随激光功率上升或焊接速度减小,焊缝成型由钉形向“X”形转变。

随着复合焊技术的发展,振镜激光-GTAW复合,激光-等离子弧复合等新型复合焊接技术在钛合金焊接中逐步推广,但以上技术均停留在实验室阶段,向工程化的应用还需进一步研究。

3 展望

目前,钛合金激光-GTAW复合焊接技术多停留在实验室阶段,其工程化应用研究必将成为以后各研究机构关注的焦点。

由于钛合金热物理性能特殊,焊接过程特殊,有特殊保护需求,关于钛合金激光-GTAW复合焊接的温度场、应力场以及接头组织演化等机理研究,是其向工程化应用的基础。目前,关于薄板钛合金激光-GTAW复合焊接技术的研究较多,中厚板钛合金的焊接及其在船舶海工领域的工程化应用是钛合金激光-GTAW复合焊接技术发展的一个重要方向。随着复合焊接技术的发展,双光束激光-GTAW复合和振镜激光-GTAW复合等新型复合焊接技术在钛合金领域的应用得到越来越多的关注。

此外,随着图像识别技术的发展,以离线编程和焊缝跟踪技术为基础的全自动焊接技术从电弧焊和激光焊领域向激光-GTAW复合焊领域拓展,是钛合金激光-GTAW复合焊技术工程化应用的必由之路。现代船舶技术对高性能大型钛合金复杂结构件的需求日益增多,以激光-GTAW复合热源的大型钛合金复杂结构件增材制造技术,对提高熔敷效率,改善零件性能有着重要意义,是钛合金激光-GTAW复合焊接技术的研究热点。

参考文献:

- [1] Yang M, Zhang H, Qi B, et al. Effect of arc behavior on Ti-6Al-4V welds during high frequency pulsed arc welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 243: 9-15.
- [2] Choi B H, Choi B K. The effect of welding conditions according to mechanical properties of pure titanium [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 201(1/3): 526-530.
- [3] Gao F, Li P, Liao Z. The effect of conditions on microstructure and properties of titanium alloy electron beam welding [J]. Materials Science and Engineering A, 2018, 721: 117-124.
- [4] Zhou J, Tsai H L, Wang P C. Hybrid laser-arc Welding of aerospace and other materials [M]//Welding and Joining of Aerospace Materials. Wood Head Publishing, 2012: 109-141.
- [5] Pasang T, Amaya J M S, Tao Y, et al. Comparison of Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr welds performed by laser beam, electron beam gas tungsten arc welding [J]. Procedia Engineering, 2013, 63: 397-404.

- [6] Christoph L, Manfred P. Titanium and titanium alloys [M]. Weinheim: German Aerospace Center Institute of Materials Research, 2002.
- [7] Tsai C J, Wang L M. Improved mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy by electron beam welding process plus annealing treatments and its microstructural evolution [J]. Materials & Design, 2014, 60: 587-598.
- [8] 刘黎明, 史吉鹏, 王红阳. 低功率激光诱导电弧复合焊接钛合金薄板工艺研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(18): 38-50.
- [9] Steen W M, Eboo M. Arc augmented laser-welding [J]. Metal Construction, 1979, 11(7): 332-335.
- [10] Chen M H, Li X Y, Liu L M. Effect of electric field on interaction between laser and arc plasma in laser-arc hybrid welding [J]. IEEE Transaction Plasma Science, 2012, 40 (8): 2045-2050.
- [11] 史吉鹏. 钛合金低功率脉冲激光调控电弧焊接物理机制及工艺研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [12] 李陈寅. 基于低能耗高效率目标的脉冲激光诱导电弧物理机制及复合焊接工艺研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- [13] 王军. 铝合金光纤激光及其复合焊接的等离子体行为与工艺研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [14] Gasalino G, Campanelli S L, Ludovico A D. Laser-arc welding of wrought to selective laser molten stainless steel [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 68: 209-216.
- [15] Xu Xinkun, Song Gang, Zhao Shuang, et al. Effect of distance between the heat sources on energy transfer behavior in keyhole during laser-GTA welding titanium alloy[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 55: 317-325.
- [16] 赵宇宏, 欧阳自鹏, 胡佩佩, 等. 激光-TIG 复合焊接温度场和应力场的有限元分析[J]. 上海航天, 2012, 29(6): 68-72.
- [17] 杨林波. TA15 钛合金激光-TIG 复合焊接及保护工艺研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- [18] 王敏, 谷侃锋, 魏强, 等. 激光-TIG 复合热源焊接钛合金 T 形结构焊缝成形特点及影响因素分析 [J]. 焊接学报, 2010, 31(12): 106-109.
- [19] 刘晓寒, 倪家强, 刘艳梅, 等. TA15 钛合金薄板激光-TIG 复合焊接接头疲劳性能研究[J]. 热加工工艺, 2009, 48(3): 15-18.
- [20] 熊俊, 付忠奎, 鄢忠武, 等. 中厚度 TC4 激光-TIG 复合焊工艺研究[J]. 热加工工艺, 2015, 44(15): 1001-3814.
- [21] 许飞, 何恩光, 陈俐, 等. 钛合金扫描振镜激光-TIG 复合焊接工艺研究[J]. 应用激光, 2020, 40(5): 855-859.
- [22] 姚伟, 巩水利, 陈俐. 激光/等离子电弧复合热源能量参数对钛合金焊缝成形的影响[J]. 焊接学报, 2006, 27(9): 81-84. 

关于热加工工艺聘请编委的通告

为了顺应“十四五规划”这个新时期,促进热加工工艺期刊发展,热加工工艺编辑部特聘请新一届编委:2021-2025 届编委。

热加工工艺期刊由中国船舶集团主管,中国船舶集团热加工工艺研究所(十二所)和中国造船工程学会船舶材料委员会主办,创刊于 1972 年。主要报道铸造、锻压、焊接、金属材料及热处理等领域的试验研究论文。在国内外具有较大影响,是金属学及金属工艺类全国中文核心期刊,中国科技论文统计与分析用刊,常年被中国知网数据库收录。

为进一步加强与外界合作与学术交流,发挥专业技术媒体的平台作用,更好地服务于热加工工艺领域,推广交流新技术,加强科技成果向生产力转化,推动技术进步,提高行业经济效益,特聘请具有一定造诣的专家、学者和具有一定代表性的单位负责人担任本刊编委。专家应该具备高工、研究员及以上职称,学者应该具备副教授、教授及以上职称。热烈欢迎相关领域院士担任本刊编委。编委享有以下权利:颁发编委证书;优先发表论文;获赠期刊;编委成就宣传。

如您愿意担任本刊编委,请您索取并填写本刊编委申请登记表。

本刊邮箱: rjggy@vip.163.com

联系电话: 029-38316274(张编辑) 029-38316271(编务权老师) 029-38316052(李主编)