

DOI:10.3963/j.issn.1671-7953.2023.03.010

船舶铝合金焊接工艺方法对比分析

祁麟, 喻军, 李超, 赵立苏

(上海外高桥造船有限公司, 上海 200137)

摘要:针对船舶铝合金材料在焊接过程中的技术难点,综合分析船用铝合金常用的惰性气体保护焊、激光电弧复合焊和搅拌摩擦焊等工艺方法在铝合金焊接过程中的关键要素,探讨焊接质量改善方法,对船舶铝合金焊接工艺在技术特点、生产效率、应用范围等方面的差异进行归纳和比较,明晰各类船用铝合金焊接工艺的应用前景。

关键词:船用铝合金;惰性气体保护焊;激光电弧复合焊;搅拌摩擦焊;爆炸焊

中图分类号:U671.83

文献标志码:A

文章编号:1671-7953(2023)03-0043-05

在节能减排、绿色造船的背景下,使用轻质合金替代传统碳钢材料成为了船舶轻量化的重要选择,铝合金因其具有密度低、比强度高、易加工、耐腐蚀以及可焊性良好的特点成为首选材料^[1]。然而,与传统碳钢材料相比,铝合金在传统熔化焊过程中普遍存在易氧化、气孔多、接头软化、易开裂、焊后变形大等问题,对铝合金材料的应用范围形成了严重制约^[2]。为此,考虑分析影响船用5xxx系、6xxx系铝合金在常用焊接工艺方法下焊接质量的关键因素,对比工艺的技术特点,为造船企业实现由“钢”到“铝”的技术升级转型提供思路。

1 船用铝合金焊接难点分析

在造船材料方面,综合考虑全系铝合金在强度、延展性、抗腐蚀性、裂纹倾向性和可焊性等方面的性能,船壳结构主要采用5xxx系铝合金(5052、5083、5086、5454等)制作,船用挤压型材采用6xxx系铝合金(6005、6061、6063等)居多,见图1。尽管5xxx系和6xxx系铝合金的可焊性相对较好,但在船舶领域大构件尺寸、复杂非标的焊接位置、以及相对粗放型的制造过程中,船用铝合金焊接依然面临着严峻的挑战。与传统钢材料相比,船用铝合金主要焊接难点如下。

1) 氧化能力强:铝和氧亲和力强,在空气中

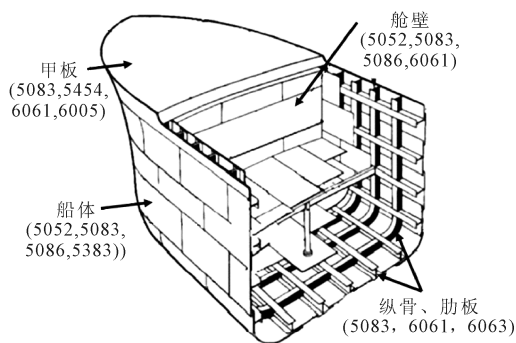


图1 部分铝合金船体选材说明

容易形成一层厚度约0.01~0.05 μm致密的Al₂O₃薄膜,该氧化膜的熔点(2 054 ℃)远高于铝合金的熔点(5083铝合金约600 ℃),在焊接过程中难以熔化并最终导致焊缝夹渣、氢气孔等焊接缺陷。因此,焊前准备和清理工作非常重要。

2) 易产生氢气孔:铝合金在固液两相的溶氢能力相差19倍,在焊接过程中,焊丝和工件氧化膜中残留的水分会以氢原子的形式溶解在熔融金属中^[3],在快速凝固过程中,从熔池中析出的氢气无法及时完全逸出,最终在焊缝内部产生氢气孔缺陷。

3) 变形和裂纹倾向性大:铝合金热膨胀系数为钢的2倍左右,热导率接近钢的3倍,凝固时体积收缩率约为5%~7%,经历焊接热循环后易产生严重变形^[4];此外,铝合金作为典型的共晶合金,在快速凝固过程中溶质元素来不及扩展,接头性能不均匀,在应力作用下极易产生裂纹。

4) 焊缝软化严重:传统钢材料焊接中,焊缝金属强度通常不低于母材,而铝合金中Mg、Zn等低沸点合金元素在电弧高温作用下极易蒸发或烧

收稿日期:2022-12-31

修回日期:2023-02-07

第一作者:祁麟(1993—),男,博士,工程师

研究方向:船舶焊接工艺

损,焊缝力学性能较母材发生明显下降,冷轧后的 5xxx 系铝合金经过焊接热循环后,焊缝强度较母材下降约 5%~10%,而热处理后的 6xxx 系铝合金,焊后焊缝强度较母材下降约 20%~30%。

上述原因是制约铝合金在船舶领域发展的主要因素。此外,铝合金由于高温强度低、流动性好、固液转化无颜色变化等特点,给半自动惰性气体保护焊工艺在焊接过程中带来更大的挑战,对操作人员要求更高。因此,为了在实际生产过程中可以更好地掌握铝合金的焊接工艺,结合上述挑战对船舶领域常用的焊接方式进行综合分析对比。

2 铝合金惰性气体保护焊

2.1 钨极惰性气体保护焊

钨极惰性气体保护焊(TIG 焊)是以钨合金作为电极,氩气作为保护气的高质量连接工艺。在焊接铝合金材料时,具有焊接稳定、焊缝成形美观以及机械性能良好等特点^[5]。铝合金 TIG 焊通常采用交变电流,在电流的负半周波,接负极的工件表面会受到正离子的激烈撞击,高熔点的氧化膜在阴极雾化作用下破碎;在电流的正半周波,接负极的钨极处仅占电弧总热量的 1/3,钨极得以冷却,避免了过热熔化后的焊缝夹钨问题。

铝合金 TIG 焊的主要焊接参数包括电流强度、保护气流量、电弧电压、送丝速度和焊接速度等。参数的选择应该从避免缺陷、减小变形、兼顾效率的角度入手,在焊接过程中宜采用低线能量的方法,提高焊接速度。同时,应采用左焊法,有利于获得成形更好、缺陷更少、更光泽的焊缝。

TIG 焊的缺陷在于其熔深较浅、热输入相对较高、焊接速度相对较慢,通常只适用于 6 mm 以下的薄板。而船舶领域中板材厚度通常较厚,采用多层多道的 TIG 焊接会使焊缝金属和热影响区产生过时效,降低接头强度,根据 Samiuddin 等学者的研究成果^[6],采用 TIG 焊对厚度为 15 mm 的 5083 铝合金进行多层多道焊接,在优化后的最佳参数下,焊缝强度损失依然高达 18.26%。因此,船舶领域中铝合金 TIG 焊通常仅用于打底焊接或管件焊接。

2.2 熔化极惰性气体保护焊

熔化极惰性气体保护焊(MIG 焊)是以惰性气体为保护气的一种熔解放电电极的消耗式焊接

工艺。与 TIG 焊相比,MIG 焊可接受的焊接电流更高、焊接速度更快,非常适用于船舶领域的大规模生产作业。铝合金 MIG 焊机与钢焊接采用的 MAG 焊机基本相同,但由于铝合金焊丝强度更低,送丝设备应将 V 形驱动辊换成更平稳、光滑的四轮驱动设备。同时,应选择推拉式焊枪、或拉丝式焊枪替代传统鹅颈推丝式焊枪。

铝合金 MIG 焊通常选择直流反接法,利用阴极雾化效应去除铝合金工件表面氧化膜^[7]。普通 MIG 焊采用小电流短路过渡或大电流射流过渡,其飞溅量大,在焊接铝合金时成形较差。而脉冲 MIG 焊通过输出一定频率和幅值的电流可以实现一脉冲一熔滴的脉冲射流过渡形式,其中中频脉冲法频率高、能有效清理氧化膜,适合高效自动焊接。而低频脉冲法(双脉冲法),见图 2,可以在焊工不摆动焊枪的情况下获得近似于 TIG 焊接的高质量焊缝外观^[8]。与普通 MIG 焊相比,可以更加精确地控制能量密度,消除气孔、裂纹等焊接缺陷,改善接头强度、冲击韧性等力学性能。

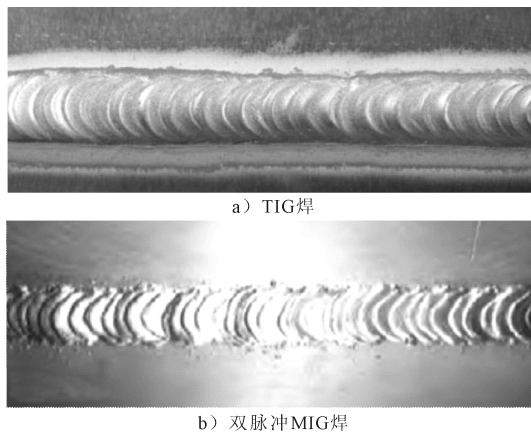


图 2 不同焊接工艺焊缝外观对比

在工件焊接前,应采用丙酮清洗表面油污,然后用不锈钢抛光轮打磨铝合金工件表面,随后用钢丝刷再次清理坡口处氧化膜,以避免氧化膜导致的各类焊接缺陷。此外,为了容纳所需填充金属量以达到 MIG 焊工艺所需的电流大小,降低气孔等焊接缺陷,铝合金 MIG 焊的工件坡口角度通常大于钢材料所开坡口。此外,铝合金热导率高,焊接工装应采用点接触式工装以避免熔池过快凝固。在铝合金薄板焊接中,从经济角度出发可采用 100% 的纯氩气作为保护气体,而氦气具有更高的导热性,随着工件板厚的增加,需要加入比例为 30%~80% 的氦气,以提高焊接速度、增大熔

深、减少气孔率。在焊接参数选择方面需要遵循能量密度大、焊接速度快、线能量密度低的原则,以消除氢气孔等焊接缺陷、并避免过大的焊接变形。

3 铝合金激光电弧复合焊

激光-MIG 复合焊结合了激光焊与电弧焊两种工艺。与惰性气体保护焊工艺相比,激光-MIG 焊复合作用可以拓展熔深、熔宽,从而减少焊道次数,控制焊接变形。与传统激光深熔焊相比,激光-MIG 复合焊可以提升匙孔稳定性、增加熔池存在时间、补充合金元素、增加焊后热处理功效,从而实现提升成形质量、减少氢气孔、咬边等焊接缺陷、降低焊缝软化程度、改善接头力学性能、降低对工件装配精度要求等一系列技术优势。激光-MIG 复合焊具有两种引导模式,采用激光引导时,焊缝成形质量更佳;采用电弧引导时,接头力学性能更好。

激光-MIG 复合焊主要工艺参数包括:激光功率、电弧电流电压、焊接速度、激光与电弧中心距离、激光电弧主导方式、保护气体成分及流速等^[9],各种工艺参数的变化会存在正、反两方面的作用。尽管激光-MIG 复合焊相比传统激光焊有了长足的进步,但在焊接过程中焊缝中的气孔缺陷依然难以彻底消除,Casalino 等学者采用激光-MIG 复合焊工艺对 5xxx 系铝合金材料进行变参数研究^[10],得到焊缝形貌见图 3。

少气孔率,但在最优参数下,焊缝气孔率依然接近 5%;而随着热输入的不断提升,焊瘤等其他缺陷也随之产生。因此,在调节工艺参数时,要综合考虑多种参数的复合影响,要在尽可能消除氢气孔的同时,避免焊瘤、变形过大等问题,提升焊接速度以保证企业的生产效率。

4 铝合金搅拌摩擦焊

搅拌摩擦焊(FSW)是可以在非熔化状态下实现材料可靠连接的固相焊技术。与传统熔化焊相比,FSW 工艺在焊接铝合金时具有线能量低焊后变形极小,非熔化避免铸造组织缺陷,机械搅拌无需清理氧化膜,接头强度高无明显软化,无需添加保护气以及安全无污染等诸多优势。与钢材料相比,铝合金的塑性变形温度仅为 450 °C 左右,在此温度下搅拌头可以保持良好的机械性能。对于目前船舶领域常用的 5xxx 系和 6xxx 系铝合金可以实现 1~20 mm 板材厚度的可靠连接,可焊接的接头类型包括对接、搭接、T 型和角接头。

FSW 工艺的参数包括搅拌头种类、转速、压力、插入深度、焊接倾角和焊接速度^[11]。其中,搅拌头旋转速度作为关键参数,通常由被焊材料决定,对于船舶领域常用的 5083 和 6061 铝合金,常采用大于 600 r/min 的强规范。搅拌头的插入深度和焊接速度通常取决于待焊材料的厚度。

尽管搅拌摩擦焊具有熔化焊难以实现的诸多技术优势,但其仍存在自身的局限性,例如对工件刚性约束的要求极高,夹具的通用性较差,工件背面需要垫板,设备昂贵等。

5 铝钢爆炸焊

基于轻量化、结构强度、技术成本、耐腐蚀性等方面的综合考量,在中大型船舶设计建造过程中,船舶主体仍采用钢制结构,而铝合金越来越多地被应用在船舶上层建筑用于减轻重量、降低重心。由于铝钢熔点等物理属性差异巨大,传统熔焊工艺会在铝钢接合面处生成 $FeAl_3$ 和 Fe_2Al_5 等脆性的金属间化合物,无法实现可靠连接。而采用传统铆接工艺连接时,接头密封性、耐腐蚀问题以及工序复杂程度都制约了铆接工艺在船舶领域的应用。

现阶段,船舶领域对于铝合金上层建筑和钢船体的连接主要通过铝钢复合过渡接头实现,见

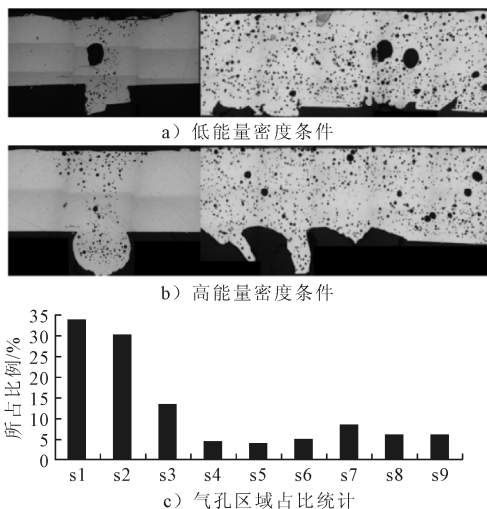


图 3 激光-MIG 复合焊焊缝形貌

结果表明,在焊缝内部分布着大量的气孔缺陷,采用高能量密度的方式虽可以一定程度地减

图 4。

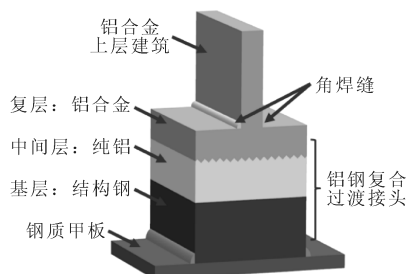


图 4 铝钢复合过渡接头示意

铝钢复合过渡接头由船用铝合金、工业纯铝和船用钢 3 种材料经过爆炸焊复合而成^[12]。在爆炸焊过程中,覆板在炸药产生的百万级兆帕压力作用下撞向基板,在接合面处产生塑性流动和高速射流,同时将铝合金氧化膜喷射出来,实现工件连接。

6 船用铝合金焊接工艺对比

与汽车、机车、航空航天领域有所不同,船舶

表 1 船用铝合金焊接工艺主要技术特点对比

焊接方法	适用位置	适用板厚/mm	焊接速度/(mm·min ⁻¹)	主要优缺点
TIG 焊	管子、管板	<6	100~200	成形美观、焊缝强度高 仅适用于薄板、效率低
普通 MIG 焊	全位置	<50	300~900	电弧功率大、焊接速度快 变形较大、缺陷相对较多
脉冲 MIG 焊	全位置	<12	200~600	焊接变形较小、焊接缺陷少 焊接效率略低、设备成本较高
激光-MIG 复合焊	对接、T 形、角接	<15	1 000~2 000	焊接变形小、焊接效率最高 精度要求极高、气孔等缺陷多
搅拌摩擦焊	对接、搭接、T 形、角接	<20	500~1 500	变形极小、力学性能好、环保 通用性差、设备昂贵
爆炸焊	搭接	<30	/	铝-钢高可靠性连接 焊接热循环后易开裂

高效自动化焊接是各大造船企业不断追求的目标,铝合金激光-MIG 复合焊的焊接速度可高达 1 000~2 000 mm/min,对于厚度小于 15 mm 的板对接、T 形和角接焊缝,其焊接效率较 MIG 焊接提升约 3~4 倍,且焊接变形更小。但是,目前激光-MIG 复合焊对于装夹精度要求依然过高,气孔、咬边等缺陷依然难以根除,设备成本相对较高,这些因素制约了该工艺的规模应用。

搅拌摩擦焊在机理上与传统熔化焊具有本质不同,现阶段对于板厚小于 20 mm 的对接、搭接、T 形和角接焊缝已经可以实现高效高质量焊接,其变形极小、无铸造缺陷和安全环保等显著优势

领域焊接工件具有非标定制化,板厚范围大,焊接位置复杂等特点,在工艺选择方面需要综合考虑适用范围、技术特点、生产效率、设备成本等多方面因素。

船用铝合金焊接工艺的主要技术特点见表 1。尽管 TIG 焊的焊接速度最低,但其成型质量、焊缝性能最优,对于厚度较薄、性能要求极高的管系连接,应优先选用 TIG 焊工艺。铝合金 MIG 焊可以采用更大的焊接电流,其焊接速度较 TIG 焊提高了约 3~5 倍,并且适用于厚度在 50 mm 以下板材的多层多道焊接。对铝合金中厚板(12 mm 以下)进行焊接时,普通 MIG 焊方法的热输入难以控制,容易造成变形、焊接缺陷等问题,采用脉冲 MIG 焊方法,焊接速度虽略有下降,但其一脉一滴的射滴过渡方式能大幅降低焊接飞溅、抑制焊接缺陷、提高成形质量,减少焊接变形。因此,现阶段 MIG 焊工艺在造船领域占据着 80% 以上的铝合金焊接任务。

正推动该工艺的发展,挪威已有超过 20% 的船用铝合金结构采用搅拌摩擦焊工艺连接。随着夹具通用性问题的解决以及设备成本的降低,搅拌摩擦焊工艺在未来国内船舶制造领域具备广阔的发展前景。

7 结论

在碳达峰、碳中和背景下,铝合金材料在豪华邮轮上层建筑和双燃料船 LNG 舱罐具有充足的发展动力和广阔的应用前景。鉴于铝合金与传统钢材料可焊性的巨大差异,分析各类铝合金焊接工艺过程中的技术要点和控制措施,并将各类焊

接工艺的适用位置、板厚、焊接速度和技术特点进行横向综合对比分析,揭示了各类工艺在高效自动焊接背景下的优劣,为企业在铝合金工艺开发方面提供参考。未来应重点开展铝合金脉冲 MIG 焊的工艺开发研究、同时充分利用薄板车间的激光电弧复合焊接设备开发铝合金焊接工艺,尽快拥有铝合金材料的高效自主焊接能力。

参考文献

[1] 茅海波,丁荣辉,朱其柱,等. 船舶用铝合金板材性能,应用与展望[C]. 中国长三角铝业高峰论坛暨上海铝业行业协会年会论文集,2013(1):48-60.
[2] 刘晓莉. 船舶制造中铝合金焊接工艺研究[D]. 上海:上海交通大学,2008:6-8.
[3] 张宏伟. 铝合金常见焊接缺陷分析[J]. 轻合金加工技术,2010(1):53-54.
[4] 钟广军,毛申飞. 铝合金船体焊接变形及其控制措施[J]. 船舶与海洋工程,2016(5):74-76.
[5] 陈和. 铝合金船舶建造中的工艺特点初探[J]. 船舶物资与市场,2020(6):34-35.

[6] Samiuddin M, Li JL, Taimoor M, Siddiqu MN, Xiong JT. Investigation on the process parameters of TIG-welded Aluminum alloy through mechanical and microstructural characterization [J]. Defence Technology, 2021 (4):23-25.
[7] 张欣. 铝镁复合板直流双脉冲 MIG 工艺及质量控制技术研究[D]. 南京:南京理工大学,2016:13-15.
[8] 高智慧,仇凤平,郑向宇,等. 船舶上层建筑铝合金分段焊接质量控制要点[J]. 造船技术,2022(3):90-91.
[9] 庄凯. 船用 E 级钢高功率激光焊接接头组织与韧性的研究[D]. 上海:上海交通大学,2010.
[10] Casalino G, Mortello M, Leo P, Benyounis KY, Olabi AG. Study on arc and laser powers in the hybrid welding of aa5754 Al-alloy. Materials & Design, 2014 (61):191-198.
[11] 刘红伟,王法科,王冬生,等. 5A06 铝合金焊接接头性能研究[J]. 兵器材料科学与工程,2009(2):72-73.
[12] 毛秋水,李敬勇,张新宇,等. 焊接热循环对铝-铝-钢复合过渡接头性能的影响[J]. 船舶工程,2010(3):54-57.

Comparative Analysis of Welding Processes of Aluminum Alloys for Ships

QI Lin, YU Jun, LI Chao, ZHAO Li-su

(Shanghai Waigaoqiao Shipbuilding Co., Ltd., Shanghai 200137, China)

Abstract: In view of the technical difficulties of marine aluminum alloy materials in the welding process, the common used welding methods of argon arc welding, laser arc hybrid welding and friction stir welding were analyzed comprehensively, as well as the key factors in the welding processes of marine aluminum alloys. The welding quality improvement methods were discussed. The differences of marine aluminum alloy welding processes in technical characteristics, production efficiency, application range and other aspects were summarized and compared, and the application prospect of various welding technology for aluminum alloy was clarified.

Key words: marine aluminum alloy; inert gas welding; laser arc hybrid welding; friction stir welding; explosive welding

(上接第 42 页)

The Hierarchical Design Method of the FPSO Deck Pipeline System

LIANG Ming-xiao, WEN Yan, YAN Yong-si

(Shanghai Waigaoqiao Shipbuilding Co., Ltd., Shanghai 200137, China)

Abstract: In order to solve the problems of FPSO deck piping system, such as the pipeline branch points are not optimal and the design process is too complicated, based on ant colony algorithm and according to the characteristics of FPSO deck piping system, the deck piping was divided into main pipe and branch pipe, so as to complete the piping system design by designing main pipe and branch pipe successively. The comparison of practical examples showed that the proposed method can effectively locate the branch point at an optimal position and the hierarchical design can effectively reduce the difficulty of design and calculation.

Key words: FPSO; deck pipeline system; pipeline routing; ant colony algorithm