

# 船用铝/钢焊接接头 BC-MIG 电弧增材制造工艺

苗玉刚, 李春旺, 尹晨豪, 魏超

(哈尔滨工程大学, 哈尔滨 150001)

**摘 要:** 选用直径 1.2 mm 的 4043 铝焊丝为增材材料, 2 mm 厚的 Q235 镀锌钢板为基板, 研究 BC-MIG 电弧增材制造工艺. 将得到的铝/钢焊接接头与 6061 铝合金板材进行焊接, 得到的 T 形材结构成形美观. 利用光学显微镜和显微硬度仪分别对接头的组织形貌和硬度分布进行分析. 结果表明, 由于温度梯度和冷却速率的差异, 界面层处铝侧为竖直向上生长的树枝晶状组织, 中部呈现结晶方向相对杂乱的晶枝结构, 顶端组织晶粒较为细小且生长无方向性. 沿着钢母材区域至界面中间层, 再至铝合金区域, 接头硬度先增加后减小至趋于平缓, 在铝/钢界面结合层区域硬度达到最大 142 HV.

**关键词:** 铝/钢焊接接头; BC-MIG; 增材制造; 微观组织; 显微硬度

**中图分类号:** TG457      **文献标识码:** A      **doi:** 10.12073/j.hjxb.2019400325

## 0 序 言

伴随船舶制造行业的进一步发展, 往往需要在建造船舶中应用材料时综合考虑材料的性能、成本以及工艺等诸多因素. 铝-钢复合结构具有较高的强度, 良好的导电性能, 能有效的降低船舶的重量达到节能减排的目的, 有利于提高船舶的机动性能, 在船舶上层建筑、舷梯等结构中应用广泛<sup>[1]</sup>. 对于船舶结构中铝/钢结构的连接一直是人们关注的焦点, 铝/钢由于明显的物理与化学性能差异导致无法进行直接焊接, 传统的连接方式为铆接、爆炸焊等, 但存在着工艺复杂, 效率低下等问题<sup>[2-3]</sup>. 铝合金与钢复合焊接的过渡接头的出现显著改善了传统焊接接头的缺点, 但对于不同船体建造的施工仍具有一定困难<sup>[4]</sup>. 由于高沉积效率, 较低的材料和设备成本以及良好的结构完整性, 使电弧增材制造成为替代现有实心坯料或大型锻件的生产方法成为可能, 尤其对于中低复杂大型构件<sup>[5]</sup>. 文中采用电弧增材制造的方法在船舶钢制甲板上堆焊铝合金覆层, 再在覆层铝合金与上层建筑等铝制结构进行焊接.

回顾铝合金电弧增材制造历程, 如何避免铝合金电弧增材制造中热裂纹和气孔的产生一直是国内外学者的研究热点. Kecsmar 等人<sup>[6]</sup>发现气孔对

铝合金焊件的疲劳寿命有显著影响, 气孔主要源于保护气体和电线中的水分. Cong 等人<sup>[7]</sup>研究表明气孔问题可以通过交流脉冲的方式调整电弧形态得到改善. 但由于连续堆积时的再次加热而产生的热积累效应, 会使铝合金内部产生热裂纹. Wang 等人<sup>[8]</sup>采用等离子-MIG 复合焊接的方法降低对 6061 铝合金接头的热输入. Gungor 等人<sup>[9]</sup>使用较低热输入的 CMT 作为成形热源, 得到的铝合金增材结构微观组织更加精密, 无明显气孔和热裂纹, 力学性能大大提高. 可见, 控制铝合金增材过程的热输入对于避免气孔及热裂纹的产生至关重要, 但以 CMT 为热源大大提高了增材的成本.

文中提出一种低热输入高效增材技术——旁路分流 MIG 焊. 试验证明, 该新技术不仅保留了以 MIG 为热源时的熔敷速度快、沉积效率高等优点, 还通过分流的手段减小了对母材的热输入, 具有热输入低、成形精度高等优势<sup>[10-11]</sup>. 文中以 4043 铝合金为增材材料, 进行电弧增材试验, 对沉积层组织和力学性能进行分析, 以 6061 铝合金作为 T 形材翼板进行焊接, 验证该制造新方法在船舶铝钢焊接时的可行性.

## 1 试验方法

试验采用直径 1.2 mm 的 4043 铝合金焊丝作为增材材料, 以 2 mm 厚的 Q235 镀锌钢为母材, 将

得到的铝/钢接头与 6061 铝合金板材进行焊接, 得到最终的 T 形材结构. 焊丝、母材及板材化学成分见表 1~表 3. 利用旁路分流 MIG 焊接设备进行增材试验, 试验工艺机理见图 1.

表 1 4043 焊丝的化学成分 (质量分数, %)  
Table 1 Chemical composition of 4043

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Al
4.5~6.0	0.8	0.3	0.05	0.023	0.1	余量

表 2 Q235 钢化学成分 (质量分数, %)  
Table 2 Chemical composition of Q235 steel

Si	C	Cr	S	Mn	Fe
0.22	0.12~0.2	0.18	≤0.045	0.48	余量

表 3 6061 铝合金的化学成分 (质量分数, %)  
Table 3 Chemical composition of 6061

Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Si	Al
0.15~0.4	0.15	0.8~1.2	0.25	0.04~0.35	0.15	0.4~0.8	余量

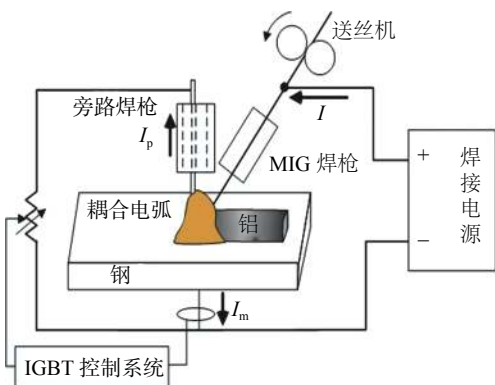


图 1 旁路分流电弧增材原理图

Fig. 1 Schematic diagrams for bypass-current arc additive manufacturing

试验的主电弧由双电弧组成, 即旁路 TIG 电弧与主路 MIG 电弧形成的耦合电弧, 此耦合电弧的电、磁、热与传统 MIG 电弧不同, 在其共同作用下能精确控制焊接热输入量, 能有效保证界面间金属化合物的形成. 增材过程中, 总电流  $I$  流经 MIG 焊枪焊丝被分割为两部分: 一部分电流  $I_p$  通过旁路焊丝流回焊接电源, 另一部电流  $I_m$  流向母材. 利用 IGBT 控制系统调节 TIG 旁路分流  $I_p$  以此调节分配到母材电流  $I_m$  的比例, 使得作用于熔池和熔滴上的热、力处于理想水平. 另外由于旁路钨极与 MIG 焊丝共同产生的耦合电弧可增加焊丝的熔化速度, 提高焊丝的熔化效率, 增加了焊缝的熔敷率, 使电弧增材变得更为高效. 由于旁路 TIG 焊枪的分

流作用, 总热量不变的情况下流进母材的热输入量减小, 通过控制热输入量的分布能有效控制界面成形的稀释率, 对于物理性能与化学性能差异较大的两种异种金属连接是一种十分可靠的连接方式.

增材试验中焊接工艺参数为: 主路电压, 电流分别为 15.6 V, 74 A, 旁路电流 55 A. 主路焊枪保护罩距母材 12 mm, 旁路焊枪距母材 4 mm, 焊枪间距 5 mm. 焊接速度在 0.78 m/min, 主路保护气流量 15 L/min, 旁路保护气流量 5 L/min. 角焊接采用 MIG 焊枪焊接, 焊接参数为焊接电流为 86 A, 电弧电压为 19.8 V. 焊枪与焊缝的水平距离为 1 mm, 呈 50° 进行焊接. 焊接时保护气为 15 L/min, 焊接速度 0.69 m/min.

## 2 试验结果及分析

### 2.1 增材过渡接头与 T 形材结构形貌

在镀锌钢板上增材铝合金, 相邻两道焊缝的搭接距离是否合适对单层铝合金的表面成形精度起重要作用, 距离过小会导致相邻的两道焊缝重叠区域大而表面凸起, 相反距离过大会使相邻两道焊缝之间存在间隙, 甚至空洞滞留在焊后零件内部<sup>[12]</sup>. 试验中通过不断调整确定了最佳搭接距离为 1 mm 时, 相邻焊缝表面间最为平滑, 整体成形美观, 图 2 为增材制造的铝/钢过渡接头. 在增材形成的铝/钢过渡接头表面采用 6061 铝合金板材进行角焊接, 焊接过程无明显飞溅, 焊接性明显改善, 得到 T 形材结构如图 3 所示.



图 2 铝钢过渡接头表面形貌

Fig. 2 Surface shape for aluminum steel transition joint

### 2.2 增材过渡接头微观组织分析

图 4 给出了 T 形材结构件各特征区的微观组织形貌, 其不同位置处的微观组织差异性由该处熔池的温度梯度和冷却速率共同决定. 图 4a 为铝/钢连接处的分界面微观组织, 由于熔池与母材相接触, 该处的温度梯度较大, 熔池冷却速度很快, 因此界面层处铝侧为竖直向上生长的树枝晶状组织. 随着与母材距离的增加, 同时由于热积累的效应, 温

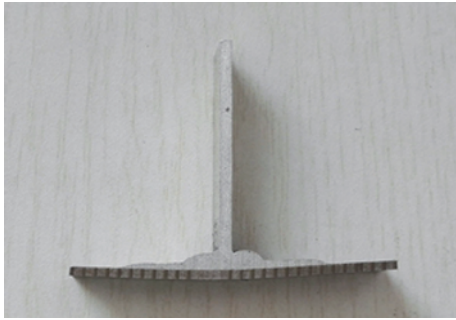
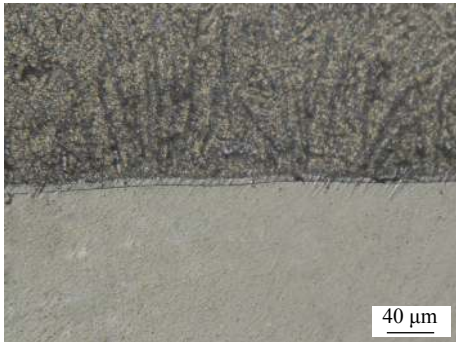


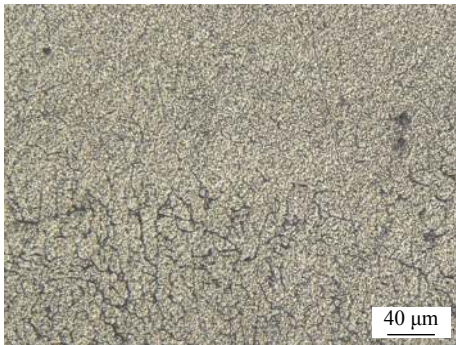
图 3 T 形材结构横截面形貌

Fig. 3 Cross-sectional shape of the T-section structure

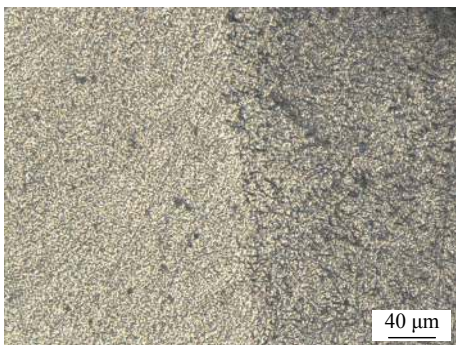
度梯度变小, 冷却速度增加, 中部呈现结晶方向相对杂乱的晶枝结构. 到了顶端, 由于与空气直接接触, 冷却速度较快, 组织晶粒较为细小且生长无方向性. 图 4c 为角焊缝区域微观组织, 深颜色的为增



(a) 铝/钢分界层处微观组织形貌



(b) 沉积层中部及顶端微观组织形貌



(c) 角焊缝结合区微观组织形貌

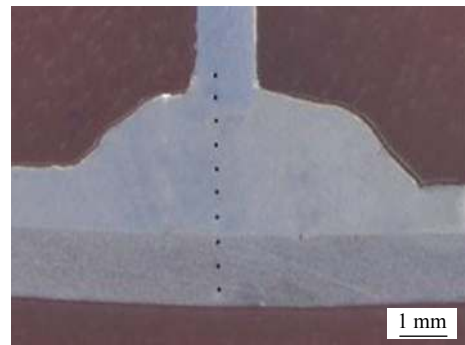
图 4 T 形材各特征区微观组织形貌

Fig. 4 Microstructure of T-section different feature areas

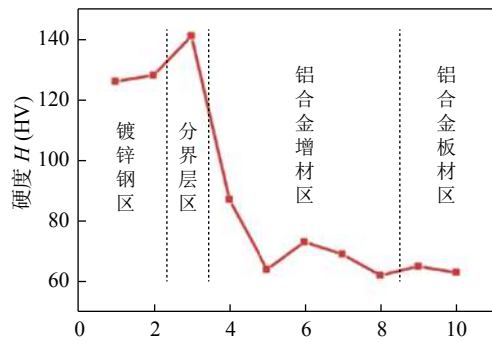
材铝, 浅颜色为 6061 铝合金, 可以看出两种铝合金有不同的金属晶格, 熔合良好, 没有发现明显的焊接热裂纹以及气孔. 同时观察发现由于旁路分流的低热输入, 有效减小了铝合金组织内部气孔的产生, 有利于提高构件的力学性能.

### 2.3 显微硬度

采用型号为 HXD-1000TM 的显微硬度测试仪对铝钢接头进行硬度测试, 硬度测量时对铝、钢不同材料区域使用不同的压载, 每隔 0.5 mm 打一个点. 铝合金组织部分载荷为 1 N, 加载 10 s; 镀锌钢组织表面载荷为 20 N, 加载 10 s, 硬度采点位置及测试结果如图 5 所示.



(a) 测试位置



(b) 测试位置

图 5 T 形材横截面显微硬度

Fig. 5 Micro-hardness of T-section structure

由硬度测试结果可知, 整个 T 形材在纵向硬度变化分为四个区域, 即镀锌钢区、铝钢连接处分界层区、4043 铝合金增材区以及 6061 铝合金板材区. 根据纵向硬度分布折线图, 可以看出镀锌钢区域基本硬度在 126 HV 左右, 在镀锌钢与铝合金的连接分界层区域内金属硬度高于两侧金属, 达到 142 HV. 这是由于在界面层处增材时 Al, Fe 元素相互向对方区域扩散, 熔池凝固后形成了新的界面化合物, 这些化合物的固溶, 相对于分界层的硬度、强度乃至组织性能等增幅比较大, 增加了该区域的硬度.



铝合金增材区中部硬度相对于其它区域铝合金的硬度较小,从增材区域微观组织中可以看出该处的金属晶格较大,这是由于焊缝中部的保温时间较高,冷却速度最慢,使晶粒不断长大,从而降低了硬度.由于 6061 铝合金硬度较增材成形的铝合金硬度低,硬度曲线在两种铝合金融合附近处再次出现波动,随后硬度稳定在 63 HV 附近.从整体来看,铝/钢过渡接头分界层处的硬度大于母材的硬度,可推断出此种方法充分提升了界面结合层的拉伸强度.

### 3 结 论

(1) 采用旁路分流 MIG 电弧焊接新工艺,在镀锌表面对 4043 铝合金进行单层多道增材,获得了表面光滑的铝/钢焊接过渡接头,与 6061 铝合金焊接形成的 T 形材结构成形美观.

(2) 对 T 形材结构件各特征区的微观组织进行观察发现内部没有气孔及热裂纹,旁路分流的低热输入,有效减小了铝合金组织内部易出现的焊接缺陷.界面层处铝侧为竖直向上生长的树枝晶状组织,中部呈现结晶方向相对杂乱的晶枝结构,顶端组织晶粒较为细小且生长无方向性.

(3) T 形材接头界面硬度测试结果显示,沿着钢母材区域至界面中间层,再至铝合金区域,接头硬度先增加后减小至趋于平缓,铝合金中部由于晶格粗大降低了组织硬度,硬度曲线产生波动,在铝/钢界面结合层区域硬度达到最大,高于两侧金属为 142 HV,验证了该增材制造工艺具有可行性.

#### 参考文献:

- [1] 宋 军, 张文平, 华先锋. 船用铝钢复合材制备工艺研究 [J]. *兵器装备工程学报*, 2016, 37(3): 129 – 131.  
Song Jun, Zhang Wenping, Hua Xianfeng. Manufacturing process of aluminium steel clad plate for warship[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2016, 37(3): 129 – 131.
- [2] 王建民, 朱 锡, 刘润泉. 铝/钢爆炸复合界面的显微分析 [J]. *材料工程*, 2006(11): 36 – 39, 44.  
Wang Jianmin, Zhu Xi, Liu Runquan. Micro analysis of bonding interfaces of explosive welded aluminum/steel plates[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2006(11): 36 – 39, 44.
- [3] 李 妍, 刘 宁, 黄健康, 等. 提高铝钢焊接接头力学性能的研究现状 [J]. *电焊机*, 2017, 47(2): 102 – 106.  
Li Yan, Liu Ning, Huang Jiankang, *et al.* Research status of improving the aluminum steel welded joint mechanical properties[J]. *Electric Welding Machine*, 2017, 47(2): 102 – 106.
- [4] 王绪明. 钢-铝结构过渡接头的性能特点及焊接工艺 [J]. *船海工程*, 2008, 37(3): 20-22.  
Wang Xuming. Property and welding procedure of the Steel-aluminum structural transition joint[J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2008, 37(3): 20-22.
- [5] Williams S W, Martina F, Addison A C, *et al.* Wire+arc additive manufacturing[J]. *Materials Science and Technology*, 2016, 32(7): 641 – 647.
- [6] Kecsmar J, Sheno R A. Some notes on the influence of manufacturing on the fatigue life of welded aluminum marine structures[J]. *Journal of Ship Production*, 2004, 20(3): 164 – 175.
- [7] Cong B Q, Qi Z W, Qi B J, *et al.* A comparative study of additively manufactured thin wall and block structure with Al-6.3%Cu alloy using cold metal transfer process[J]. *Applied Sciences-Basel*, 2017, 7(3): 275 – 285.
- [8] Wang Y J, Wei B, Guo Y Y, *et al.* Microstructure and mechanical properties of the joint of 6061 aluminum alloy by plasma-MIG hybrid welding[J]. *China Welding*, 2017, 26(2): 58 – 64.
- [9] Gungor B, Kaluc E, Taban E, *et al.* Mechanical and microstructural properties of robotic cold metal transfer (CMT) welded 5083-H111 and 6082-T651 aluminum alloys[J]. *Materials & Design*, 2014, 54(2): 207 – 211.
- [10] 苗玉刚, 吴斌涛, 韩端锋, 等. 铝/镀锌钢异种金属旁路分流 MIG 电弧熔钎焊界面区组织与接头性能 [J]. *焊接学报*, 2014, 35(9): 6 – 10.  
Miao Yugang, Wu Bintao, Han Duanfeng, *et al.* Characteristics of joint and interface layer during bypass-current MIG welding-brazing of aluminum and steel dissimilar metals[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2014, 35(9): 6 – 10.
- [11] Miao Y G, Xu X F, Wu B T, *et al.* Effects of bypass current on the stability of weld pool during double sided arc welding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(8): 1590 – 1596.
- [12] Ding D H, Pan Z X, Cuiuri D, *et al.* Bead modelling and implementation of adaptive MAT path in wire and arc additive manufacturing[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2016, 39: 32 – 42.

第一作者简介: 苗玉刚, 男, 1978 年出生, 博士, 副教授, 博士研究生导师. 主要从事特种焊接技术与增材制造方面的教学和科研工作. 发表论文 40 余篇. Email: [miaoyg@hrbeu.edu.cn](mailto:miaoyg@hrbeu.edu.cn)