第 42 卷 第 12 期　　焊　接　学　报　　Vol. 42(12):72 − 77
2021 年 12 月　　TRANSACTIONS OF THE CHINA WELDING INSTITUTION　　December 2021

铝-钢堆焊-搅拌摩擦复合焊接头特性分析

苗玉刚[1]， 赵羽扬[1]， 刘吉[1]， 尹晨豪[2]， 吕磊[3]

(1. 哈尔滨工程大学, 哈尔滨, 150001; 2. 中国船舶重工集团公司第七二五研究所, 洛阳, 471023;
3. 哈尔滨第一机械集团有限公司, 哈尔滨, 150056)

摘要: 针对铝-钢异种金属焊接缺陷多、效率低等问题, 提出一种堆焊-搅拌摩擦复合焊接方法, 即采用旁路分流电弧焊先在钢板上堆敷铝合金, 再采用搅拌摩擦焊进行铝合金堆敷层和铝合金母材的搭接焊, 得到在铝-铝界面呈现典型搅拌摩擦焊“洋葱圆环”状结合的铝-铝-钢复合过渡接头. 针对典型焊缝进行铝-钢异种金属接头的组织结构分析. 结果表明, 搅拌摩擦焊可以有效消除铝合金堆敷层中存在的气孔等缺陷, 并实现金属界面层的减薄. 对铝钢结合界面进行 EDS 扫描, 在堆敷铝合金侧可以观察到呈树枝状的 Fe 相扩散和呈网状的不均匀 Si 相扩散, 结合 XRD(X-ray diffraction) 分析其主要成分为 $Al_5Fe_2Zn_{0.4}$ 和 $Al_7Fe_3Si_{0.3}$. 对接头试样进行拉伸试验, 拉伸接头断裂在铝合金母材处, 达到铝合金母材强度的 100%, 符合接头应用的力学指标.

创新点: (1) 搅拌摩擦焊可以消除旁路分流堆焊过程中的气孔, 形成洋葱圆环状的机械互锁结构.
(2) 搅拌摩擦焊可以减薄堆焊过程中生成的铝-钢间金属化合物层, 并对组织的晶粒进行细化.
(3) 复合焊接工艺获得的接头拉伸强度超过铝合金母材, 较传统单一工艺焊接实现力学性能的强化.

关键词: 铝-铝-钢复合接头; 旁路分流 MIG 电弧焊; 搅拌摩擦焊; 显微组织; 力学性能
中图分类号: TG 457　　**文献标识码:** A　　**doi:** 10.12073/j.hjxb.20210816002

0　序言

铝-钢异种金属的可靠性连接是船舶、汽车、轨道交通、航空航天等轻量化的关键. 但是由于铝-钢之间在物化、机械性能方面存在较大差异, 采用单一的焊接工艺焊接容易出现气孔、裂纹等焊接缺陷或者出现接头软化现象, 导致接头的力学性能下降[1-3]. 因此若要采用焊接方法实现铝合金上层建筑与钢制船体之间的有效连接, 越来越多的船舶开始采用复合过渡接头实现铝合金上层建筑和钢制船体的连接.

国内外对于铝-钢结构的复合过渡接头进行了大量研究, 目前主要采用爆炸焊的方式制备铝-钢复合过渡接头. 爆炸焊工艺获得的接头金属界面通常会呈现周期性波状结合形态, 这种平滑的波状或锯齿状的结合可以有效的提高材料之间的机械结合性, 是提高铝-钢多层复合接头强度的重要因素[4].

在层叠式结构过渡接头的基础上, 王承权等人[5] 拟定设计了搭接式的铝钢爆炸焊复合过渡接头, 降低了复合过渡接头重量, 为文中的过渡接头设计提供了可行的参考. 但是该接头仍然采用爆炸焊的方式制备, 在中间层铝厚度小于 2 mm 的情况下不能获得符合标准的接头, 说明采用爆炸焊的工艺制备搭接式复合过渡接头存在一定的局限性. 除此以外爆炸焊制备铝-钢复合过渡接头还存在两方面的问题, 其一是为了满足舰船设计应力水平要求, 铝-钢过渡接头厚度和板条宽度必须有一个最小极限, 造成过渡接头尺寸较大, 反而增加了船体的总重量[6]; 其二是铝钢复合过渡接头一旦发生分层破坏情况, 很难对接头进行修复, 返修成本高昂[7].

由于爆炸焊成本较高且存在一定的局限性, 实现铝-钢异种金属过渡接头的可靠连接依然是国内外研究热点. 苗玉刚等人[8] 基于旁路分流理论, 进行了铝-钢增材制造工艺的研究, 选用直径为 1.2 mm 的 ER4043 铝合金焊丝在 2 mm 厚的 Q235 镀锌钢板上进行增材, 获得了良好的增材制造成形, 形成了铝-钢异种金属过渡接头. 林志成[9] 探究了旁路分流 MIG 焊接 Q235 钢和 6061 铝合金, 最佳工艺

收稿日期: 2021 − 08 − 16
基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51975138); 国防基础科研资助项目(KY10100190023).

参数下获得的焊接接头最大抗拉强度为 187.1 MPa, 超过铝母材的抗拉强度. 在电弧焊接中, 旁路分流 MIG 焊接具有热输入量小, 金属熔敷率高, 母材稀释率低的特点, 可以在控制层间温度的情况下, 保证整体工艺的焊接效率. Chitturi 等人[10] 采用正交试验的方式探究了 5052 铝合金和 304 不锈钢的最佳焊接工艺参数, 发现可以通过增加搅拌头倾角减少隧道缺陷. Sameer 等人[11] 采用搅拌摩擦焊制造 2 mm 的双相 600钢和 AA6082-T6 铝合金平板接头, 接头的最高抗拉强度为 240 MPa, 接头强度达到铝合金母材的 85%. Hong 等人[12]采用超声波辅助搅拌摩擦焊的方式, 利用机械搅拌和超声波振动双重驱动效应, 抑制了 IMC 的层厚, 相较于传统搅拌摩擦焊接头拉伸性能提高 27.9%. 搅拌摩擦焊热输入很低, 主要依靠金属的塑性流动作用实现异种金属的可靠连接, 且焊接过程不易出现气孔、裂纹等缺陷, 适合铝合金及其异种金属的焊接.

基于此, 文中提出一种旁路分流 MIG 焊和搅拌摩擦焊复合的焊接工艺, 在 Q235 钢表面使用旁路分流 MIG 焊堆敷 ER4043 铝合金, 再结合搅拌摩擦焊的方式获得 6061 铝合金-ER4043 铝合金-Q235 钢的搭接式复合过渡接头, 并对接头的宏观成形、微观组织和结构、力学性能进行对应的分析, 验证该工艺制备复合过渡接头的工艺可行性.

1　试验方法

试验采用双面热浸镀锌的 Q235 钢和 6061 铝合金作为过渡接头铝合金过渡层两侧母材, 母材尺寸均为 200 mm × 80 mm × 3 mm. 选用直径 ϕ1.2 mm 的 ER4043 铝合金焊丝作为过渡层的堆敷金属, 试验采用的母材及焊丝的化学成分见表 1 和表 2.

表 1　母材的化学成分 (质量分数, %)

Table 1　Chemical composition of base material

材料	C	Si	Mn	Cr	P	Fe	Zn	Cu
6061	—	0.4 ~ 0.8	0.15	0.04	—	0.7	0.25	0.15 ~ 0.40
Q235	0.12 ~ 0.2	0.22	0.48	0.18	≤0.045	余量	—	—

表 2　ER4043 焊丝的化学成分 (质量分数, %)

Table 2　Chemical composition of ER4043 welding wire

Si	Fe	Cu	Cr	Mg	Mn	Ti	Zn	Al
5.0	0.8	0.3	—	0.05	0.05	0.2	0.1	余量

采用体积分数 6% ~ 10% 的 NaOH 溶液在 70 ℃ 的条件下浸泡 6061 铝合金板材 2 ~ 3 min, 再使用体积分数 15% 的硝酸溶液浸泡 1 min 进行中和处理, 最后用无水乙醇冲洗, 室温晾干备用.

试验主路使用松下 YD-400GE 全数字脉冲 IGBT 控制的电源作为焊接电源, 并在主路 MIG 焊接的基础上添加 TIG 旁路形成耦合电弧, 焊接过程采用 Ar(99.9%) 进行保护, 在 Q235 钢表面堆敷 ER4043 铝合金, 具体的焊接参数见表 3.

堆敷层焊接完成后对堆敷层表面进行铣削处理, 使堆敷层表面平整且保证堆敷层的厚度大于 1 mm, 避免由于少量飞溅、电弧晃动等因素导致界面之间不能紧密结合. 通过夹具将铝合金堆敷层和 6061 铝合金板夹紧, 选用轴肩直径为 14 mm, 搅拌针形状为带螺纹的圆台形, 圆台上部直径 4 mm, 下部直径 3.5 mm, 针长 3.3 mm. 搅拌头倾角为 2.5°, 轴肩下压量 0.2 mm, 多道焊的偏移量为 3.5 mm, 具体的搅拌摩擦焊焊接参数见表 4.

焊接结束后, 制备复合接头连接部分的金相试样, 使用扫描电子显微镜、X 射线衍射和能谱仪对

表 3　旁路分流 MIG 电弧焊工艺参数

Table 3　Bypass shunt MIG arc welding process parameters

主路电流 I/A	主路电压 U/V	旁路电流 I_p/A	焊接速度 v/(m·min^{-1})	MIG保护气气体流量 q_1/(L·min^{-1})	TIG保护气气体流量 q_2/(L·min^{-1})	MIG导电嘴高度 h_1/mm	钨极高度 h_2/mm
75	17.2	25	0.8	15	5	15	5

表 4 搅拌摩擦焊工艺参数

Table 4 Stir friction welding process parameters

焊接速度 v/(m·min^{-1})	转速 n/(r·min^{-1})	搅拌头插入深度 d/mm	焊接道数 a
150	1 000	3.3	3

显微组织及金相成分进行分析；采用万能力学试验机进行拉伸力学性能测试，验证其力学性能.

2 试验结果

2.1 铝-铝-钢复合接头结构形貌

图 1 为复合工艺各阶段主要的焊缝形貌，获得的搭接式接头成形良好，无明显的焊接变形. 图 1a 为铝-钢旁路分流 MIG 焊接获得的铝合金堆敷层焊道的宏观形貌. 单道焊缝宽度约为 7 mm ± 1 mm，焊缝表面光亮，成形均匀挺直，熔覆金属铺展性好，无表面气孔、裂纹等宏观缺陷. 通过预先的工艺对比试验分析，控制旁路电流在 10 ~ 35 A 的范围内，可以形成较为稳定的耦合电弧，有效降低对于母材的热输入，减少焊接过程中产生的飞溅，增加熔池的稳定性. 将堆焊层进行铣削后进行搅拌摩擦焊，焊道的宏观形貌如图 1b 所示，搅拌摩擦焊焊道表面均匀，无明显飞边，匙孔等缺陷，最终获得的焊接接头形式如图 1c 所示.

(a) 旁路分流 MIG 堆焊形貌

(b) 搅拌摩擦焊焊道形貌

(c) 复合过渡接头形貌

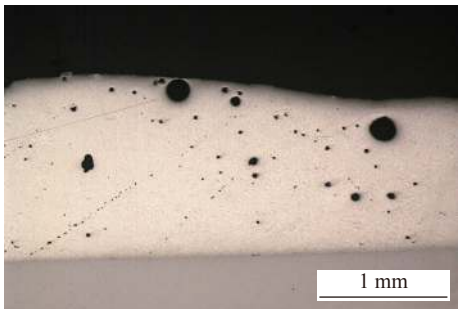
图 1 各工艺顺序下的宏观形貌

Fig. 1 Macroscopic morphology at each process sequence. (a) bypass shunt MIG surfacing profile; (b) friction stir welding channel geometry; (c) composite transition joint profile

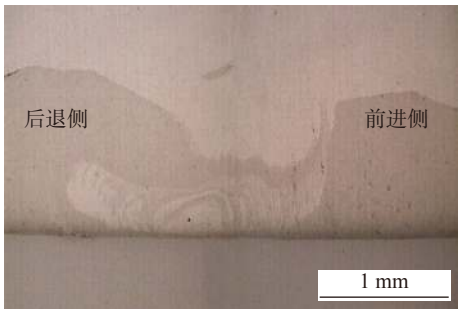
2.2 铝-铝-钢复合过渡接头界面组织结构分析

2.2.1 铝-铝-钢复合过渡接头宏观金相

图 2 为搅拌摩擦焊前后铝-钢界面宏观金相对比. 图 2a 为未进行铣削前旁路分流 MIG 堆焊铝合金堆敷层的宏观金相，由于旁路电流存在，有效降低对母材的热量输入，因此堆敷层熔深很小，钢母材与堆敷铝合金形成平直的界面结合，未发生明显的熔化. 在靠近焊缝表面处，由于该处熔池冷却速度较快，可以观察到少量皮下气孔和链状气孔.



(a) 旁路分流 MIG 焊堆敷层宏观金相



(b) 搅拌摩擦焊后接头宏观金相

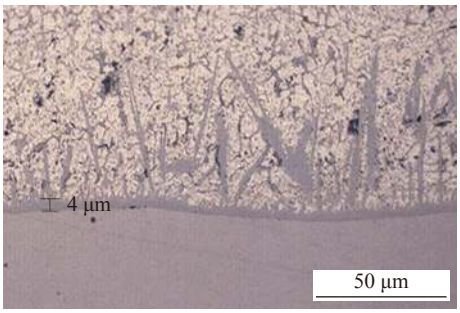
图 2 搅拌摩擦焊前后堆敷层宏观金相

Fig. 2 Macro metallurgy of the deposited layer before and after stir friction welding. (a) macroscopic metallography of bypass shunt MIG welded cladding layers; (b) macroscopic metallography of the joint after stir friction welding

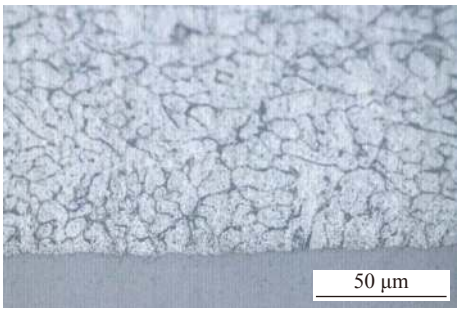
图 2b 为搅拌摩擦焊后接头部分的宏观金相，由于搅拌头的压力作用和搅拌作用，使得铝合金堆敷层金属充分进行塑性流动，使得原本在铝合金堆敷层存在的皮下气孔和链状气孔发生破坏释放. 说明该复合工艺可以在保留电弧焊接低成本、高效率特点的同时，有效解决铝钢异种金属电弧焊接中存在的气孔缺陷问题，保证接头的焊接质量. 由图 2b 可以观察到，复合工艺获得的过渡接头在焊核区域的两种铝合金材料呈现“洋葱圆环”状的混合结构，前进侧金属塑性流动方向向下，上层 6061 铝合金在搅拌作用下越过界面层，扩散到 ER4043 铝合金堆敷层当中；后退侧金属塑性流动方向向上，表现为 ER4043 铝合金的堆积，在两种材料的相对运动下形成了“洋葱圆环”状结合的机械互锁结构. 类似结构的形成是实现材料可靠性连接的重要因素，说明复合工艺具有较高的可行性.

2.2.2 铝-铝-钢复合过渡接头微观组织

图 3 给出了搅拌摩擦焊前后铝-钢界面的微观组织形貌. 图 3a 为搅拌摩擦焊前铝-钢界面微观组织, 由于 Al, Fe 元素的相互扩散, 在铝-钢界面交界处可以观察到明显的金属间化合物构成的界面层, 界面层的平均厚度为 4 μm. 在铝合金堆敷层靠近界面层的位置, 可以观察到明显的深色第二相枝状晶组织, 由界面层向铝合金堆敷层方向生长. 堆敷层铝合金的晶粒呈现出垂直界面层生长的趋势, 并且距离界面层越远, 晶粒有逐渐长大的趋势, 这是由于钢的导热率远低于铝合金的导热率造成的.



(a) 搅拌摩擦焊前界面层微观组织



(b) 搅拌摩擦焊后界面层微观组织

图 3　搅拌摩擦焊前后界面层微观组织

Fig. 3　Microstructure of interfacial layer before and after stir friction welding. (a) microstructure of the interface layer before stir friction welding; (b) microstructure of the interfacial layer after stir friction welding

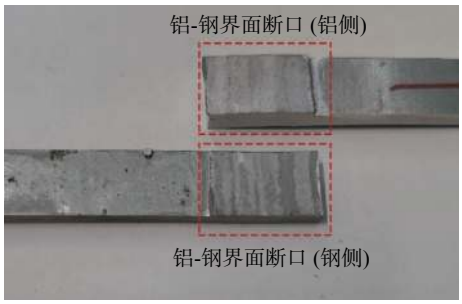
图 3b 为搅拌摩擦焊后铝-钢界面微观组织, 在搅拌头压紧力的作用下, 可以明显观察到铝-钢间界面层的减薄, 无法直接观察界面层的厚度. 由于界面层的主要成分是脆性的铝-钢间金属化合物, 控制界面层厚度有利于提高接头的力学性能, 防止发生脆性断裂[13]. 同时由于搅拌头的搅拌作用, 堆敷层部分铝合金的晶粒被进一步细化, 变得更加短小, 也有利于提高复合过渡接头的力学性能.

通过微观组织的分析, 文中提出的复合工艺可以有效的实现铝-钢金属间界面层的减薄, 并对铝合金晶粒进行细化. 但是在铝合金堆敷层界面层附近观察到部分深色的第二相树枝状晶粒, 为了进一步确认其成分, 对铝-钢界面进行 XRD 分析和 EDS (energy dispersive spectrometer) 扫描分析.

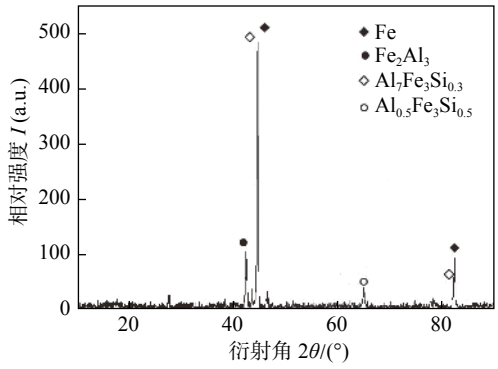
3　XRD 分析与 EDS 扫描

3.1　XRD 分析

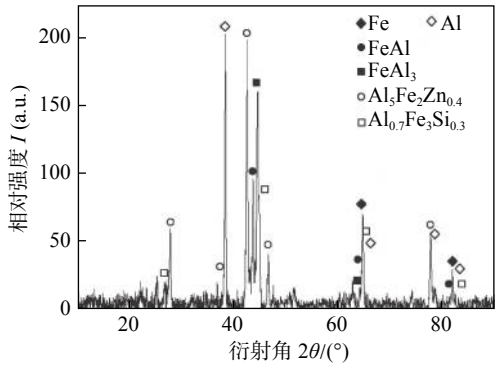
为分析铝-钢界面物相组成, 选取断口在铝-钢界面层的试样, 分别对钢制母材侧和铝合金母材侧的铝-钢界面层进行 X 射线衍射 (XRD) 分析, 结果如图 4 所示.



(a) XRD 分析试样



(b) 钢侧衍射分析



(c) 铝侧衍射分析

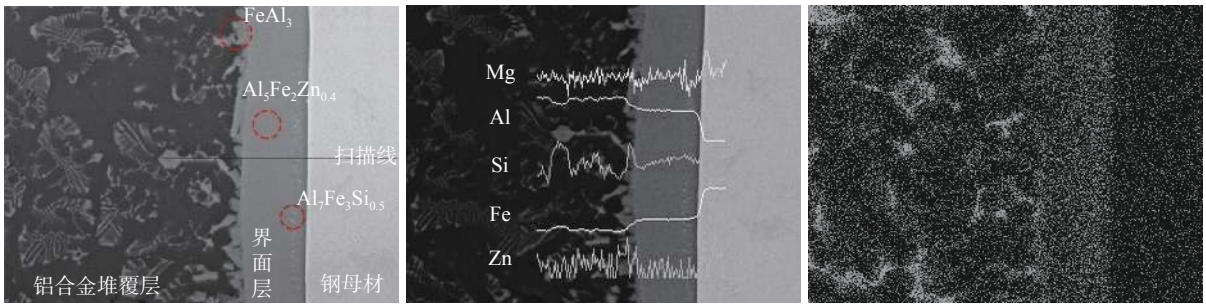
图 4　XRD 分析结果

Fig. 4　XRD analysis results. (a) XRD analysis specimens; (b) steel side diffraction analysis; (c) aluminium side diffraction analysis

图 4a 为 X 射线从钢侧进行衍射分析的结果. 从 X 射线衍射峰可以看出, 钢侧以 Fe 相为主, 夹杂有 $Al_7Fe_3Si_{0.3}$, Fe_2Al_3 以及 $Al_{0.5}Fe_3Si_{0.5}$ 等金属间化合物. 通过衍射强度的对比, 除 Fe 相外, 在衍射角 $2\theta = 45°$左右位置可以观察到相对衍射强度很高的 $Al_7Fe_3Si_{0.3}$ 衍射峰, 且缝宽很窄, 说明对应成分的晶粒成形度很高. 图 4b 为 X 射线从铝侧进行衍射分析的结果, 从 X 射线衍射峰可以看出, 铝合金堆敷层侧以 Al 相为主, 存在部分的 Fe 相的扩散, 还夹杂有 $FeAl_3$, FeAl, $Al_5Fe_2Zn_{0.4}$ 以及 $Al_{0.7}Fe_3Si_{0.3}$ 等金属间化合物. 除 Al 相外, 在衍射角 $2\theta = 40° \sim 50°$位置可以观察到多个 $Al_5Fe_2Zn_{0.4}$ 衍射峰, 缝宽相对较宽, 说明对应成分的结晶度较低. 在 45° ~ 50°的区间内可以观察到衍射角度和强度均接近的 Fe 相和 $FeAl_3$ 相, 说明观察到的呈树枝状的 Fe 相扩散过程同时伴随有 Fe 相的流动和 Fe-Al 间金属化合物的形成.

3.2 EDS 扫描分析

为了进一步验证 XRD 获得的物相扩散的相关情况, 对相关元素在接头制备过程中的扩散情况进行分析. 对堆焊-搅拌摩擦焊复合工艺获得的铝-铝-钢复合接头截面的铝/钢界面熔合区域进行 BSE (backscattered electron imaging) 电镜扫描, 获得清晰的组织物相分布, 并选取特征扫描线如图 5a 所示. 图 5b 为对扫描线进行 EDS 线扫描获得的 Al, Fe, Mg, Si, Zn 元素的含量变化, 可以发现 Mg, Zn 在接头中各特征区均呈现均匀分布的特征, 无明显的含量变化, 说明上述元素在铝-钢焊接过程中无明显影响; Al, Fe 元素在各特征区域内表现为均匀分布, 在界面交接处有明显的含量变化, 且在界面层靠近钢侧的变化曲线斜率更大, 验证了微观组织部分观察到的 Fe 相向 Al 相的扩散情况; Si 元素的含量存在较大波动, 为进一步验证其扩散分布规律, 对 Si 元素进行 EDS 面扫描, 结果如图 5c 所示. 可以观察到 Si 元素呈现散布式的网状不均匀分布, 且与 Fe 元素扩散情况并不完全重合, 说明第二相夹杂主要与 Si 元素相关, 结合 XRD 分析其主要成分可能为 $Al_7Fe_3Si_{0.3}$.



(a) BSE 扫描结果及特征扫描线 (b) 各元素含量变化 (c) Si 元素 EDS 面扫描结果

图 5 EDS 扫描分析

Fig. 5 EDS scan analysis. (a) BSE scan results and feature scan lines; (b) variation in the content of each element; (c) EDS surface scan results for element Si

4 力学性能及断口分析

为验证接头的力学性能, 截取 3 个尺寸为 100 mm × 10 mm 的复合接头试样进行拉伸试验, 测试获得的典型断口扫描图像如图 6 所示. 3 个接头均断裂在铝合金母材处, 平均抗拉强度为 214 MPa, 大于 6061 铝合金母材理论抗拉强度205 MPa. 断口整体较为灰暗, 存在大量的撕裂棱和韧窝, 为典型的韧性断裂特征. 复合工艺下接头力学性能提升的原因: 复合工艺实现了热输入的有效控制和金属间界面层的减薄, 减少了脆性金属间化合物的含量; 形成了搅拌摩擦焊的典型“洋葱圆环”结构.

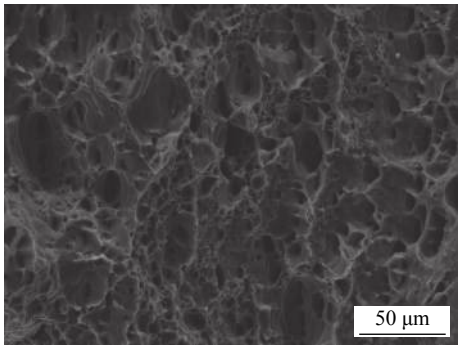


图 6 拉伸试验结果

Fig. 6 Tensile experiment results

以上特征说明文中提出的复合工艺加工获得的铝-钢复合过渡接头具有良好的力学性能, 能达到接头应用的相关要求.

5　结论

(1) 采用旁路分流 MIG 焊和搅拌摩擦焊结合的方式, 获得了 ER6061 铝合金-ER4043 铝合金-Q235 钢的复合过渡接头, 在保留电弧焊接优势同时可以有效消除电弧堆焊过程中产生气孔缺陷, 压缩铝-钢金属间化合物界面层厚度, 接头整体成形良好.

(2) 通过微观组织和物相能谱的相关分析, 可以在铝合金堆敷层内观察到树枝状的 Fe 相扩散和散布式的网状 Si 相扩散, 分析其主要成分为 $Al_5Fe_2Zn_{0.4}$ 和 $Al_7Fe_3Si_{0.3}$.

(3) 复合过渡接头在拉伸测试中, 接头最高抗拉强度大于 6061 铝合金母材, 接头均断裂于铝母材处, 呈现韧性断裂特征.

参考文献

[1] Li K H, Chen J S, Zhang Y M. Double-electrode GMAW process and control[J]. Welding Journal, 2007, 86(1): 231 − 237.

[2] Zhang Changqing, Wang Shuwen, Luo Dechun, *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.

[3] Wallerstein Daniel, Salminen Antti, Lusquiños Fernando, *et al*. Recent developments in laser welding of aluminum alloys to steel[J]. Metals, 2021, 11(4): 622.

[4] 刘迪. 铝钢爆炸焊复合板微观结构和性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
Liu Di. Microstructure and properties of Al/steel explosively welded composite plates[D]. Harbin:Harbin Engineering University, 2019.

[5] 王承权, 张京立. 舰船钢—铝结构过渡接头的应用及节点设计 [J]. 船舶工程, 2004(6): 34 − 38.
Wang Chengquan, Zhang Jingli. Application and node design of naval steel-aluminum structural transition joints[J]. Ship Engineering, 2004(6): 34 − 38.

[6] 王承权, 夏炳仁. 铝合金上层建筑与钢主船体的新型焊接过渡接头 [J]. 船舶工程, 1999(4): 26 − 28.
Wang Chengquan, Xia Bingren. A new welded transition joint between aluminum superstructure and steel main hull[J]. Ship Engineering, 1999(4): 26 − 28.

[7] 黄健, 邱文, 张吉, 等. 钢铝过渡接头的应用研究 [J]. 船舶与海洋工程, 2016, 32(4): 54 − 58.
Huang Jian, Qiu Wen, Zhang Ji, *et al*. Research on the application of steel-aluminum transition joints[J]. Ship and Marine Engineering, 2016, 32(4): 54 − 58.

[8] 苗玉刚, 李春旺, 尹晨豪, 等. 船用铝/钢焊接接头 BC-MIG 电弧增材制造工艺 [J]. 焊接学报, 2019, 40(12): 129 − 132.
Miao Yugang, Li Chunwang, Yin Chenhao, *et al*. BC-MIG arc additive manufacturing process for marine aluminum/steel welded joints[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(12): 129 − 132.

[9] 林志成. 舰船用钛-钢/铝-钢焊接工艺机理研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020.
Lin Zhicheng. Research on the mechanism of titanium-steel/aluminium-steel welding process for naval vessels [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2020.

[10] Chitturi V, Pedapati S R, Awang M. Challenges in dissimilar friction stir welding of aluminum 5052 and 304 stainless steel alloys[J]. Materialwissenschaft and Werkstofftechnik, 2020, 51(6): 811 − 816.

[11] Sameer M D, Anil Kumar Birru. Investigations on microstructural evolutions and mechanical properties of Dual-Phase 600 Steel and AA6082-T6 Aluminum Alloy dissimilar joints fabricated by friction stir welding[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2019, 72(2): 353 − 367.

[12] Hong Kairong, Wang Yong, Zhou Jianjun, *et al*. Investigation on ultrasonic assisted friction stir welding of aluminum/steel dissimilar alloys[J]. High Temperature Materials and Processes, 2021, 40(1): 45 − 52.

[13] Yuan Rui, Deng Shengjie, Cui Haichao, *et al*. Interface characterization and mechanical properties of dual beam laser welding-brazing Al/steel dissimilar metals[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 40(4): 37 − 45.

第一作者: 苗玉刚，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与科研工作；Email：miaoyg@hrbeu.edu.cn.

（编辑：　郑红）