

铝合金/镀锌钢 TIG 熔钎焊接头界面组织及力学性能

哈尔滨工业大学现代焊接生产技术国家重点实验室(150001) 林三宝 马广超 宋建岭 杨春利

摘要 采用 TIG 熔钎焊进行了铝基钎料在镀锌钢板上的润湿铺展试验及铝合金与镀锌钢板的搭接试验,分析了钎料在钢表面的润湿铺展性,研究了接头界面组织,并测试了接头力学性能。研究表明,在 TIG 电弧热源作用下铝基钎料在镀锌钢板上润湿铺展良好,钢板未熔化,润湿角 $< 20^\circ$; 获得了较好的铝合金与镀锌钢搭接接头,钢母材侧为钎焊连接,金属间化合物层厚度 $< 9.0 \mu\text{m}$,从焊缝侧到钢侧金属间化合物经历了 $\text{FeAl}_3 \rightarrow \text{Fe}_2\text{Al}_5 + \text{FeAl}_2 \rightarrow \text{FeAl}_2 + \text{FeAl}$ 的转变,铝母材侧为熔焊连接,焊缝晶粒尺寸明显增大;搭接接头存在局部“未钎合”缺陷,成为裂纹根源,导致接头断裂在焊根附近的焊缝上,抗拉强度仅有 90 MPa。

关键词: 铝合金 镀锌钢 TIG 熔钎焊 微观组织 力学性能

中图分类号: TG454

0 前言

铝及铝合金是目前应用最广的一种轻金属,而钢是一种最普通、最常用的黑色金属,在制造业中的主导地位至今无法撼动。但是单一金属本身不能很好的满足应用需要的所有性能,而将铝与钢连接成为异种金属结构具有独特的优势和良好的经济效益,在航空、航天、造船、石油化工、原子能和汽车等工业部门有广泛地应用前景^[1-3]。铝与钢的优质、高效连接一直是焊接领域的难题,尽管钎焊、摩擦焊、磁脉冲焊、爆炸焊、扩散焊以及超声波焊等一些焊接方法能够实现异种金属的连接,并且可以得到优质的焊接接头,但是这些方法都相应存在各种局限性而难以满足实际生产中对高生产率的要求。近来,铝/钢熔钎焊的研究成为异种金属连接的热门,主要方法为电弧焊及激光填丝焊^[4,5]。

与激光填丝焊相比,电弧焊由于具有工艺简单、操作方便、成本低廉和适用范围广等优点而成为研究的重点。文中首先进行了 TIG 电弧作用下铝基钎料在镀锌钢板上的润湿铺展试验,随后采用 TIG 熔钎焊完成了铝合金板与镀锌钢板的搭接试验,分析了界面组织,测试了力学性能,为铝合金/镀锌钢 TIG 熔钎焊接头的实际应用提供了理论和技术支持。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

试验母材为 5A06 铝合金和 Q235 镀锌钢板,板厚分别为 3.0 mm 和 1.5 mm,镀层厚度为 $20.0 \mu\text{m}$,两种材料的化学成分列于表 1 和表 2 中。试验用焊材为与铝合金母材相匹配的特种铝基焊丝,焊丝具有高的抗裂性,焊丝直径为 1.2 mm,化学成分列于表 3 中。

表 1 5A06 铝合金的化学成分(质量分数,%)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Be	Ti	Al
0.40	0.40	0.10	0.5 ~ 0.8	5.80 ~ 6.80	0.20	0.000 1 ~ 0.000 5	0.02 ~ 0.10	余量

表 2 Q235 钢的化学成分(质量分数,%)

O	N	Mn	Si	C	S	P	Fe
0.019	0.045	0.61	1.0	0.16	0.023	0.019	余量

表 3 特种铝基焊丝的化学成分(质量分数,%)

Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ni	Al
0.88	< 0.05	0.05	0.35	0.33	< 0.05	< 0.05	余量

1.2 试验方法

将母材切割成 80 mm × 50 mm 规格,用打磨机去除焊件表面及侧边的氧化膜,然后用丙酮擦拭表面。试验采用方波交流 TIG 电源,首先进行铝基钎料在镀锌钢板上的润湿铺展试验,在此基础上进行铝合金与镀锌钢板的搭接试验。焊接工艺参数为焊接电流 70 ~ 90 A,电弧长度 3.0 mm,焊接速度 120 mm/min,送丝速度 300 mm/min,氩气流量 8 L/min。焊后取成形良好试件的一部分沿焊缝横截面剖开,制成金相试样,用金相显

收稿日期: 2008 - 11 - 19

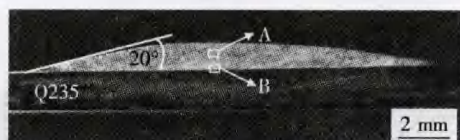
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50874033)。

显微镜观察(OM)和扫描电镜(SEM)观察接头显微组织,通过线扫描及能谱分析(EDS)分析界面组织结构;同时,将工件按照 GB2651—89 加工成拉伸性能测试件,通过万能电子拉伸机测试接头性能。

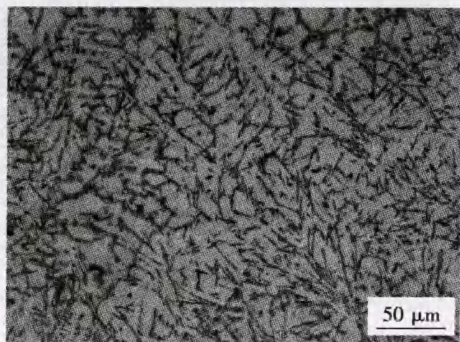
2 试验结果及分析

2.1 铝基钎料在镀锌钢板上的润湿铺展

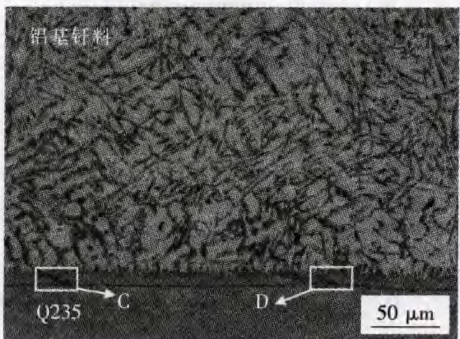
铝基钎料在镀锌钢板上的润湿铺展试验结果是进行 5A06 铝合金板与 Q235 镀锌钢板搭接 TIG 熔钎焊研究的基础,图 1 是铝基钎料在钢表面的润湿铺展宏观形貌及微观组织。从图 1a 可以看出,在试验选定的参数下,钎料润湿铺展范围较大,接头成形美观,利用 Photoshop 软件测量润湿角为 20° ,充分说明了在 TIG 电弧热源作用下铝基钎料在镀锌钢板表面具有良好的润湿铺展性。由图 1b 和图 1c 可知,钎缝开始凝固



(a) 钎料润湿铺展宏观形貌



(b) A 区焊缝微观组织



(c) B 区界面微观组织

图 1 钎料在钢表面的润湿铺展

时,液态金属以固液界面为核心开始形核,垂直于界面呈树枝状生长并向液态钎缝中心推进。而随着钎缝中散热方向的改变,晶粒生长方向发生改变,最终定向结晶被抑制,柱状树枝晶转化为等轴树枝晶^[6]。由图 1c 测得界面处存在平均厚度 $<10.0 \mu\text{m}$ 的中间层。参考 Al-Fe 二元合金相图可以判断,上述中间层主要由 Al-Fe 金属间化合物组成^[7]。由于 Al-Fe 金属间化合物层与铝合金和镀锌钢的导热系数及热膨胀系数差别较大,在焊接应力的作用下,脆性 Al-Fe 金属间化合物层局部开裂,如图 1c 中 C 和 D 区域所示。

2.2 铝合金与镀锌钢接头分析

2.2.1 接头表面形貌特征

图 2 是 5A06 铝合金/Q235 镀锌钢异种金属 TIG 熔钎焊搭接接头的宏观照片,铝合金与镀锌钢的连接较好,接头成形美观,但在 TIG 电弧热的作用下,随着焊接过程的进行,镀锌钢板表面热量积累容易引起镀锌层的过量挥发,如图 2 中 A 位置所示。镀锌层的过量挥发使得液态铝基钎料在钢表面的润湿铺展性变差,焊缝呈现变窄及内凹等缺陷,影响了接头质量。试验中通过在钢下表面加铜垫板增强镀锌钢的散热,减少了镀锌层的挥发,起到了良好的效果。

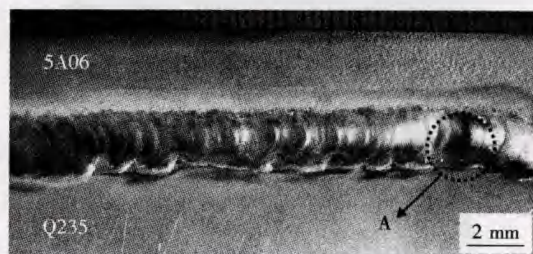
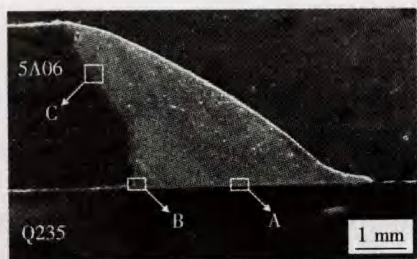


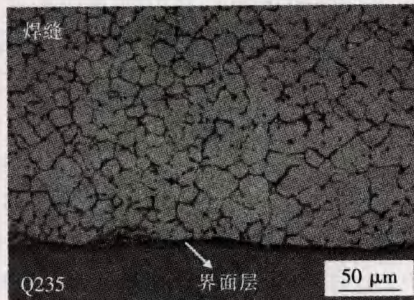
图 2 搭接接头表面形貌

2.2.2 接头宏观形貌及微观组织

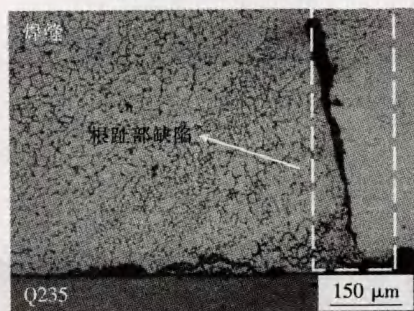
图 3 为搭接接头宏观形貌及微观组织。从图 3a 中可以看出,铝基钎料与部分铝合金母材熔化混合后在镀锌钢板表面润湿铺展良好,接头成形良好。图 3b 为接头界面层组织特征,焊缝与钢之间连接质量高,焊缝金属与未熔化钢板之间形成一层厚度 $<9.0 \mu\text{m}$ 的金属间化合物层。由图 3c 可知,接头根趾部界面存在“未钎合”缺陷,在 TIG 熔钎焊过程中,不同区域的熔池金属温度具有较大的差异,母材对熔池金属的散热作用和熔池内金属对流的不充分共同导致了铝母材熔合线根部区域温度低于钎焊温度,钎料流动性不好,因此钎料在该区润湿铺展较困难,焊接过程中该区未能



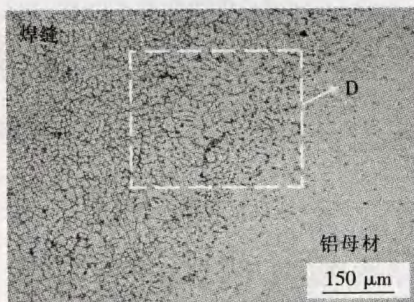
(a) 接头宏观形貌



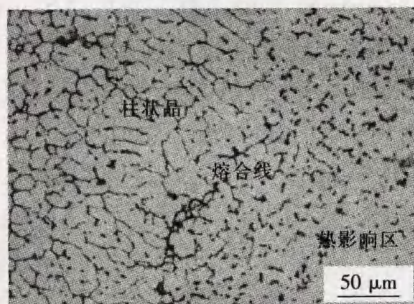
(b) A区界面微观组织



(c) B区缺陷放大图



(d) C区微观组织



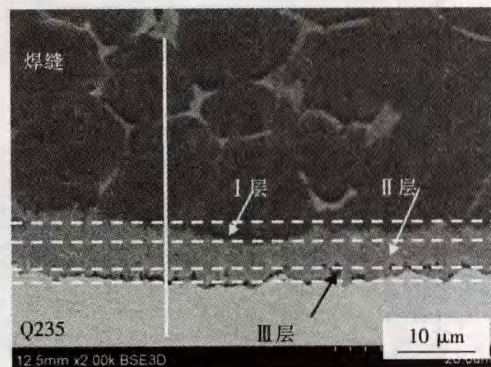
(e) D区组织放大图

图3 接头宏观形貌及微观组织

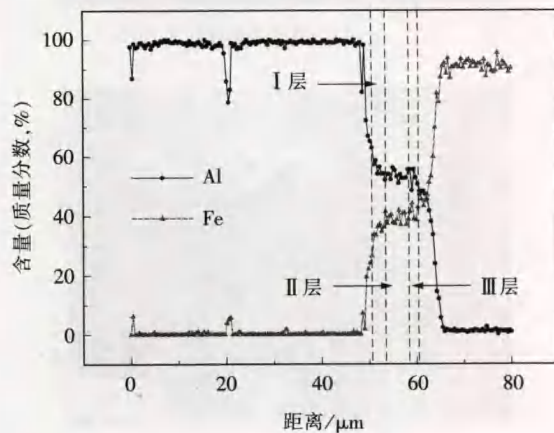
实现高质量连接,焊后在接头处留下局部“未钎合”缺陷,严重影响接头力学性能^[8]。图3d、图3e为铝合金母材侧熔合线附近微观组织,在TIG电弧热的作用下接头附近铝合金母材发生熔化与液态铝基钎料一起形成熔焊焊缝。对比母材与焊缝上的微观组织可知,在焊接热的作用下,液态铝合金以未熔化的铝母材热影响区表面为核心重新形核,并沿着垂直于界面的方向快速生长,形成一层厚度 $<91.0\ \mu\text{m}$ 的柱状晶,该层硬度、脆性高,塑性差,对接头力学性能产生不良影响。

2.2.3 接头界面层结构

对钢侧界面层进行线扫描,如图4所示,钎焊界面层可区分为3层:Ⅰ层为厚度约 $3.0\ \mu\text{m}$ 的铝侧反应层,主要组成相为 FeAl_3 ;Ⅱ层为厚度约 $4.0\ \mu\text{m}$ 中间扩散层,主要组成相为 Fe_2Al_5 ,此外还存在少量的 FeAl_2 ;Ⅲ层为厚度约 $2.0\ \mu\text{m}$ 的钢侧扩散层,由 FeAl_2 和 FeAl 共同组成,随着到钢母材距离的减小, FeAl 的含量逐渐增多。



(a) 线扫描区域



(b) 线扫描结果

图4 界面层线扫描图像

在 TIG 熔钎焊过程中电弧加热温度较高, 固态铁表面发生 Fe 和 Al 原子的相互扩散和相界面反应, 并在固液两种金属中形成扩散层, 当铝液中 Fe 浓度增大时, 首先在 Fe 和 Al 的分界面上形成与 Fe-Al 二元合金相图相符的并且 Fe 含量最低的 Fe-Al 合金层——FeAl₃ 金属间化合物。形成的合金层阻碍了铝与钢的直接接触, 但由于沿合金层厚度方向存在铝的浓度梯度, 会导致 Al 原子穿过合金层向 Fe 基体方向扩散, 当此扩散速度很高时, 合金层中形成的金属间化合物主要为 Fe₂Al₃ 和 FeAl₃ 两种富铝相, 但因 FeAl₃ 相的结晶学特性, 使其晶核不能很快长大, 所以形成的合金层区段实际上只是由热力学稍欠稳定的却有快速生长能力的 Fe₂Al₃ 相晶体构成。在靠近钢侧的区域, Fe 含量相对较多, 由于浓度不断地变化, Fe₂Al₃ 相中出现了浓度相当于金属间化合物 FeAl₂ 和 FeAl 的微小区域, 在熔钎焊温度下形成 FeAl₂ 与 FeAl 的吉布斯自由能皆为负值, 二者能够得到一定程度的长大^[9]。由上述 3 层构成的钢侧金属间化合物界面层厚度 < 9.0 μm, 能够获得良好的结合性能^[10-12]。

2.2.4 接头力学性能

对焊件进行拉伸力学性能测试, 搭接接头抗拉强度仅有 90 MPa, 断裂在焊根附近的焊缝上, 如图 5 所示。由于搭接接头焊根和焊趾部存在“未钎合”缺陷(如图 3c 所示), 接头拉伸过程中, 缺陷位置是应力集中的中心, 成为开裂的起始位置, 此外, 熔合线位置(如图 3e 所示)脆性高、塑性差也是接头断裂在该位置的一个原因。

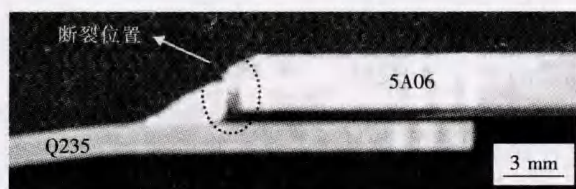


图 5 接头断裂横截面

3 结 论

(1) 在 TIG 电弧热源作用下铝基钎料在 Q235 镀锌钢板表面铺展良好, 钢板未见熔化, 润湿角达到 20°, 钎焊侧界面金属间化合物层厚度 < 10.0 μm。

(2) 搭接接头中铝母材侧发生熔化, 为熔焊连接; 钢母材未发生熔化, 为钎焊连接; 在钎焊侧形成的金属

间化合物层平均厚度 < 9.0 μm, 从焊缝侧到钢侧金属间化合物层经历了 FeAl₃ → Fe₂Al₃ + FeAl₂ → FeAl₂ + FeAl 的转变。

(3) 搭接接头焊根和焊趾部存在局部“未钎合”缺陷, 成为裂纹根源, 拉伸试件断裂于焊根附近的焊缝上, 接头抗拉强度仅为 90 MPa。

参 考 文 献

- [1] 雷 振, 秦国梁, 林尚扬, 等. 铝与钢异种金属焊接的研究与发展概况[J]. 焊接, 2006(4): 16-20.
- [2] 张撼鹏, 黄鹏飞, 殷树言, 等. 钢铝异种金属新型电弧连接法研究现状[J]. 焊接, 2005(12): 9-13.
- [3] 里亚博夫 B P. 铝及铝合金与其它金属的焊接[M]. 北京: 宇航出版社, 1990.
- [4] 林尚扬, 雷 振. 一种用于大光斑激光-电弧符合热源连接异种金属的钎剂[P]. 专利申请号: 200710143866. 8, 2007.
- [5] Rathod M J, Kutsuna M. Joining of aluminum alloy 5052 and low-carbon steel by laser roll welding[J]. Welding Journal, 2004, 83(1): 16-26.
- [6] 李巧艳, 罗 宇, 王亚军, 等. 5052 铝合金双光点激光焊接组织与性能[J]. 焊接学报, 2007, 28(12): 106-108.
- [7] Ершов А А, Сычева Т А, Засуха П Ф. Реакционная диффузия при нагреве биметаллов Сталь - Алюминий[J]. Металлы, 1976(2): 117-123.
- [8] 雷 振, 秦国梁, 王旭友, 等. 铝/镀锌钢复合热源熔-钎接头的局部“未钎合”缺陷分析[J]. 焊接学报, 2007, 28(10): 37-40.
- [9] 张 伟. 钢热浸镀铝层的组织结构和稀土镧的行为研究[D]. 博士学位论文. 西安: 西安理工大学, 1998. 14-18.
- [10] 于治水. 镀锌钢板氩弧钎焊润湿铺展及界面行为[D]. 博士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2003. 96-156.
- [11] Roulin M, Luster J W, Karadeniz G, et al. Strength and structure of furnace-brazed joints between aluminum and stainless steel[J]. Welding Journal, 1999, 78(5): 151-155.
- [12] Yu Z S, Li R F, Qi K, et al. Interfacial behavior of aluminum/steel arc brazing[J]. Journal of East China Shipbuilding Institute, 2005, 19(4): 77-81.

作者简介: 林三宝, 1972 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为高效化焊接和搅拌摩擦焊, 已发表论文 80 余篇。