

铝/钢异种金属火焰钎焊接头组织和性能

杨金龙¹, 薛松柏¹, 薛 鹏¹, 戴 玮², 吕兆萍¹, 张 满³

(1. 南京航空航天大学 材料科学与技术学院, 南京 210016;

2. 浙江新锐焊接材料有限公司, 绍兴 312452; 3. 淮阴工学院 机械工程学院, 淮安 223003)

摘 要: 通过扫描电镜、能谱分析和 X 射线衍射等方法研究了火焰钎焊时 Zn-xAl 钎料的润湿性能、铝/钢钎焊接头界面显微组织、金属间化合物层以及接头抗剪强度。结果表明, Zn-xAl 钎料配合改性 CsF-RbF-AlF₃ 钎剂, 可以有效地去除母材表面氧化膜, 从而提高钎焊接头力学性能。随着 Al 元素含量增加, 钎料铺展性和填缝性随之提高, 但是钎焊接头强度先升后降, Al 元素含量为 15% 时, 钎焊接头力学性能最佳。钎焊接头显微组织分析结果表明, 金属间化合物主要为 Fe₄Al₁₃ 相。Zn-xAl 钎料中 Al 元素含量较低时, 界面层由富锌相和 Fe₄Al₁₃ 相组成。随着 Al 元素含量的增加, 在 Zn-25Al 钎焊接头界面出现第二层金属间化合物 Fe₂Al₅ 相。

关键词: 火焰钎焊; 铝合金; 不锈钢; 显微组织; 抗剪强度

中图分类号: TG 425.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2015)01-0063-04

0 序 言

面临近年来出现的全球气候变暖、能源短缺、石油危机、燃油价格上涨等问题, 如何实现汽车车身轻量化, 提高燃油经济性已经成为汽车制造商亟待解决的问题^[1]。铝及铝合金以其比重小、耐腐蚀、易加工等优点, 在汽车制造、航空航天等领域得到了广泛的应用。欧洲的汽车轻量化项目 (super light car) 通过在车身采用多种轻质材料, 实现了减重 35% 的效果, 其中铝的用量达到了 53%^[2]。因此铝/钢结构具有广阔的应用前景, 铝/钢异种金属的焊接可以充分发挥不同材料的各自优势, 提高结构强度, 减轻结构重量, 获得良好的经济效益。

铝、钢以及以它们为基体的合金虽然早已在制造业得到了广泛的应用, 但铝/钢异种金属的焊接比常规的铝-铝、钢-钢的焊接要复杂的多。如何获得高效、可靠的铝/钢焊接接头已经成为焊接领域的热点和难点问题^[3]。近几年来, 国内外学者对铝/钢焊接问题的研究几乎涉及到焊接领域的各种方法, 如扩散焊^[4]、搅拌摩擦焊^[5]、冷金属过渡熔钎焊^[6]等。由铝铁二元相图可知, 铝和铁可以形成固溶体、金属间化合物、共晶体。铁在固态铝中的溶解度极小, 在室温条件下冷却, 即使铝中只含有少量的铁也会生成金属间化合物 FeAl₃。随着铁含量的增加, 还

会出现 Fe₂Al₅, FeAl₂, FeAl, Fe₃Al 等化合物。因此铝/钢焊接中对金属间化合物层的控制是获得优质接头的关键。钎焊通过液态钎料润湿母材, 填充接头间隙实现连接, 是一种低于母材熔点温度的焊接方法。因此铝/钢的钎焊可以有效地控制金属间化合物的形成, 获得良好的接头。而火焰钎焊操作灵活, 适应性强, 应用十分广泛。采用 Zn-xAl 系合金为钎料, 以改性 CsF-RbF-AlF₃ 钎剂为突破口, 通过自动火焰钎焊的方法实现铝合金与不锈钢的连接, 并分析了不同合金钎料对接头组织和性能的影响。

1 试验方法

1.1 合金成分设计及试样制备

试验采用质量分数为 99.99% 的锌锭, 99.9% 铝锭混合熔炼, 制备得到五种成分的 Zn-xAl 合金铸锭, 如表 1 所示。合金铸锭冷却后, 经过挤压和多道拉拔工艺制得直径为 2 mm 的焊丝。

表 1 钎料合金及成分 (质量分数, %)

Table 1 Chemical compositions of filler metals

序号	Al	Zn
1	2	余量
2	5	余量
3	15	余量
4	22	余量
5	25	余量

1.2 钎料铺展性及填缝性试验

钎料铺展性能试验按照国家标准 GB/T11364—2008《钎料润湿性试验方法》进行。试验母材为 6061 铝合金板和 304 不锈钢板,铺展性试验两种母材尺寸均为 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 3\text{ mm}$,填缝性试验两种母材尺寸均为 $110\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 。试验前对母材表面进行预处理,用 5% 的 NaOH 溶液清洗 10 ~ 15 s,温度保持在 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。清水冲洗后再用稀硝酸浸泡 15 s,依次使用清水、乙醇冲洗,晾干备用。铺展性试验将 0.15 g 钎料分别置于 6061 板和 304 板中央位置,覆盖上自制改进型 CsF-RbF-AlF₃ 钎剂,放入箱式电阻炉中。试验温度 $530\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$,保温时间 1 min。超声波清洗试样后,计算铺展面积。为了研究钎料在焊缝中填充间隙的能力,按照如图 1 所示方法进行填缝性能试验,钎料用量和试验温度条件均与铺展性能试验相同。试样冷却后,测量填缝长度。为了保证试验结果的准确性,上述每组试验均进行 5 次,取平均值。

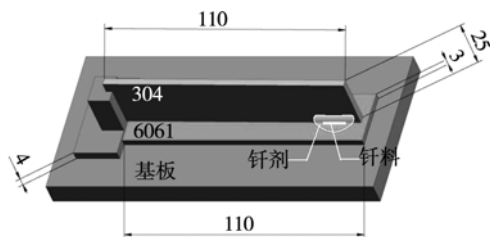


图 1 钎料填缝性能试验试样尺寸 (mm)

Fig. 1 Clearance filling ability for filler metal

1.3 焊缝力学性能试验

钎焊接头的形式选用搭接接头,搭接试样尺寸为 $60\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 3\text{ mm}$,搭接宽度 3 mm。采用自动火焰钎焊机进行火焰钎焊。钎焊接头的力学性能试验按照国家标准 GB/T11363—2008《钎焊接头强度试验方法》进行,每一种钎焊接头进行 5 组试验,取平均值。

1.4 接头显微组织观察

对铝/钢钎焊接头进行切割、镶嵌、砂纸打磨、抛光。然后用 5% HNO₃-CH₃CH₂OH 溶液腐蚀 4 ~ 6 s。采用金相显微镜和扫描电镜 (日立 S-4800N) 观察钎料显微组织,并用能谱分析方法 (EDX) 对焊缝界面元素成分进行分析。

2 试验结果及分析

2.1 钎料铺展性及填缝性比较

Zn-xAl 钎料在 6061 铝合金表面和 304 不锈钢

表面的铺展面积如图 2 所示。配合 CsF-RbF-AlF₃ 钎剂, Zn-xAl 钎料均能在铝合金和不锈钢表面铺展。在 $530\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下,随着 Zn-xAl 合金中 Al 元素含量的增加,钎料在铝合金和不锈钢表面的铺展面积均随之增大。与 Zn-2Al 钎料相比, Zn-25Al 钎料在铝合金和不锈钢表面的铺展面积分别提高了 13.5% 和 19.9%。而钎料的填缝性能也随 Al 元素含量的增加而增强,如图 3 所示,钎料的填缝性能对钎焊接头的组织均匀性、致密性以及力学性能有着重要影响。

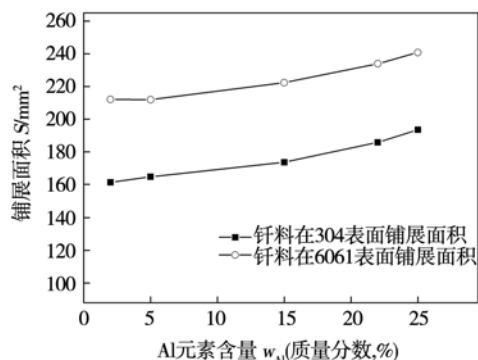


图 2 Zn-xAl 钎料铺展面积

Fig. 2 Spreading area of Zn-xAl filler metals

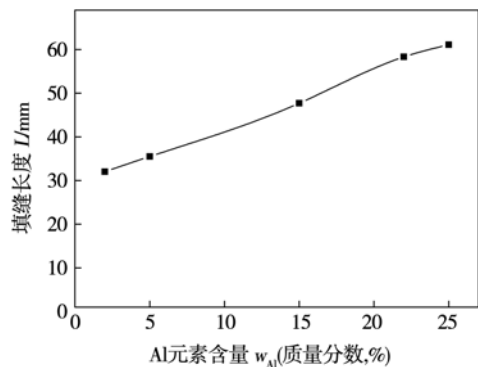


图 3 Zn-xAl 钎料填缝长度

Fig. 3 Clearance filling ability of Zn-xAl filler metals

Zn-xAl 钎料的润湿性能的提高可以通过以下两个方面来解释,首先根据锌铝二元相图,在 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,液态的锌在铝中的溶解度达到 30%,这种过高的互溶度会降低钎料在铝基板上的流动性。随着 Al 元素含量的增加,钎料中锌向铝基板中的溶解度降低,使得钎料的铺展性能增强。由于铝和铁之间很容易形成新的相,钎料和母材之间适量的金属间化合物有利于钎料在母材表面的铺展。其次随着钎料中 Al 元素含量的增加,钎料的密度随之降低,钎料的质量相同,体积增加,铺展面积增大。因此增加钎料中 Al 元素的含量可以提高钎料在基板上的铺展性和填缝性。

2.2 钎焊接头微观组织

Zn-2Al, Zn-15Al, Zn-25Al 钎料钎焊接头的显微组织如图 4a ~ 图 4c 所示. 接头组织主要由母材、界

面层、钎缝三部分组成. 钎焊接头组织的形态及其分布规律影响着接头的力学性能,适当的界面化合物层有利于提高钎焊接头的抗剪强度.

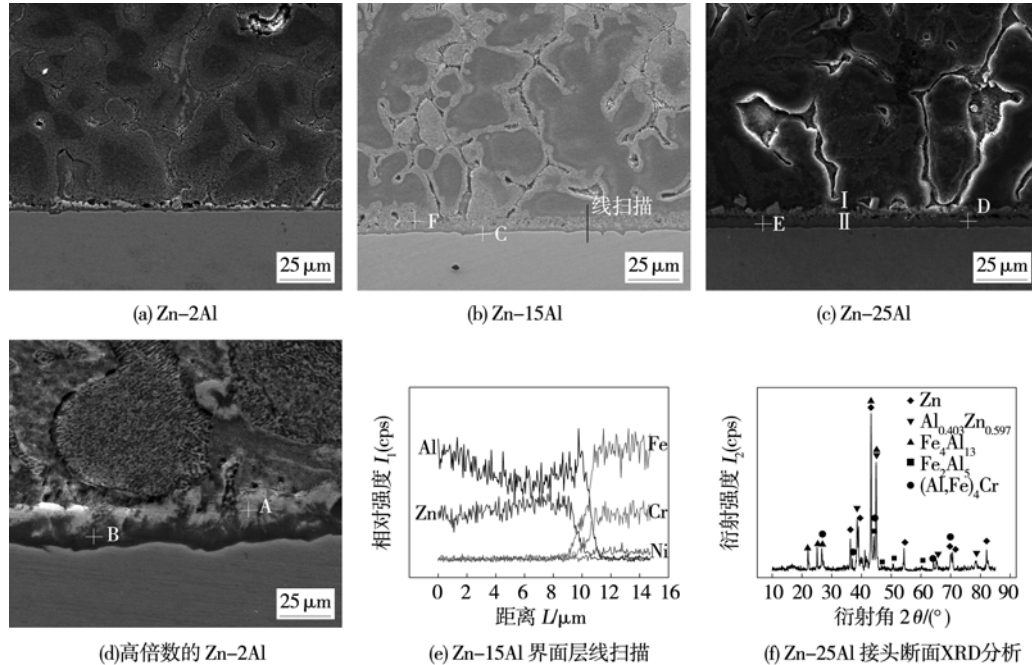


图 4 铝/钢钎焊接头微观组织

Fig. 4 Microstructures of brazing seam

在 Zn-2Al 钎焊接头中,钎缝和不锈钢母材的中间层主要由浅色层和深色层两部分组成,如图 4d 中 A, B 所示. 通过对 A, B 两点进行能谱分析可知(表 2), A 点含有 90.21% (摩尔分数,下同)的 Zn 元素,可推测浅色层主要为富锌相. 而在 B 点 Al 与 Fe 元素的摩尔比为 67.97:18.28,结合 Fe-Al 二元相图和 EDX 分析结果, B 点的金属间化合物成分主要为 $\text{Fe}_4\text{Al}_{13}$ ^[7]. 同时在富锌相界面还出现少量的空洞. 当钎料中 Al 元素含量达到 15% 时,钎缝和不锈钢界面的富锌层消失,取而代之的是铝铁共析相. 中间层主要由 Fe-Al 金属间化合物组成,如图 4b 中 C 点所示. 对接头界面进行线扫描分析,如图 4e 所示,界面 Fe-Al 金属间化合物层的厚度在 2.3 μm 左右. 而当钎料中 Al 元素的含量达到 25% 时,金属间化合物层的厚度随之增加,而且化合物层由两部分组成,如图 4c 所示, D, E 两点能谱分析结果显示,化合物层 I 中 Al 元素含量为 72.62%, Fe 元素含量为 20.39%, 化合物层 II 中 Al 元素含量为 66.39%, Fe 元素含量为 26.71%. 对 Zn-25Al 钎焊接头进行断口 XRD 分析如图 4f 所示,断面化合物主要由 $\text{Fe}_4\text{Al}_{13}$ 和 Fe_2Al_5 组成. 结合 EDX 和 XRD 分析结果, Zn-25Al 钎焊接头界面金属间化合物层 I 为 $\text{Fe}_4\text{Al}_{13}$ 相, 化合物层 II 为 Fe_2Al_5 相.

表 2 EDX 成分分析(摩尔分数, %)

Table 2 EDX composition analysis

	Zn	Al	Fe	Cr	Ni
A	90.21	7.01	2.11	0.67	—
B	10.08	67.97	18.28	2.47	1.20
C	4.48	70.75	20.26	3.11	1.40
D	5.10	72.62	20.39	0.89	1.00
E	2.63	66.39	26.71	2.91	1.36
F	63.47	31.01	4.67	0.84	—

由于钎焊过程中,只有钎料熔化,因此钎料和母材间原子的扩散以母材中原子向液态钎料中的扩散为主^[8]. 所以在钎焊过程中, Fe-Al 金属间化合物层的生长主要由 Fe 原子向富铝化合物中的扩散控制. 随着钎料中 Al 元素含量的增加,钎料熔点升高,焊接热输入增大,固态母材中原子向液态钎料中的扩散速度增加. 图 4c 中界面金属间化合物的形成过程可以概括为两个阶段: Fe 原子向液态钎料中扩散,首先与铝液反应生成 $\text{Fe}_4\text{Al}_{13}$, 然后 Fe 原子继续向 $\text{Fe}_4\text{Al}_{13}$ 化合物层中扩散,形成 Fe_2Al_5 相.

2.3 钎焊接头力学性能

对铝/钢搭接接头进行钎焊接头抗剪强度试验,接头抗剪强度如图 5 所示. 钎焊接头断裂均发生在钎料和不锈钢的界面处. 当钎料中 Al 元素含量小

于 15% 时,随着 Al 元素含量的增加,钎焊接头的抗剪强度随之增大,Zn-15Al 钎料钎焊接头达到最大抗剪强度,其值为 130 MPa。当 Al 元素含量超过 15%,接头抗剪强度随着 Al 元素含量的增加而降低。钎焊接头显微组织对焊缝的力学性能影响较大。当钎料中 Al 元素含量较低时,焊缝和不锈钢界面的富锌相严重影响了接头的力学性能。钎料中 Al 元素含量增加,界面层中的富锌相消失,接头力学性能提高。但是随着 Al 元素含量的增加,钎焊过程中热输入量随之增加,Fe-Al 金属间化合物层过度生长恶化了钎焊接头的力学性能。

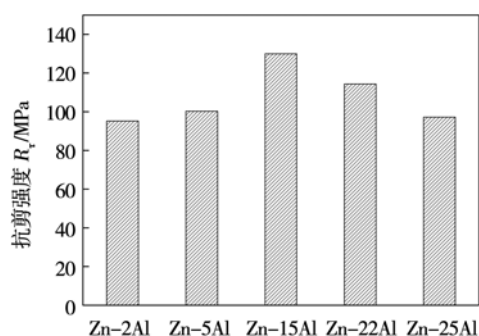


图 5 Zn-xAl 钎料钎焊接头抗剪强度

Fig. 5 Shear strength of brazed joints with Zn-xAl filler metals

3 结 论

(1) Zn-xAl 钎料配合自制改进型 CsF-RbF-AlF₃ 钎剂,可以实现铝合金与 304 不锈钢的火焰钎焊连接。采用火焰加热,配合改进型 CsF-RbF-AlF₃ 钎剂,Zn-xAl 钎料在铝合金及 304 不锈钢表面具有良好的润湿、铺展性能。

(2) 火焰钎焊时,钎焊接头界面金属间化合物主要为 Fe₄Al₁₃ 相。当 Zn-xAl 钎料中 Al 元素含量较低时,界面会出现富锌相。而随着 Al 元素含量的增加,过量的 Al 元素会使 Fe-Al 金属间化合物层厚度迅速增加,出现第二层金属间化合物 Fe₂Al₅ 相。

(3) 铝合金/不锈钢钎焊接头力学试验表明,当钎料中 Al 元素含量为 15% 时,钎焊接头的抗剪强

度达到最大值 130 MPa。Al 元素含量继续增加,钎焊接头抗剪强度呈下降趋势。

参考文献:

- [1] Choi C Y, Kim D C, Nam D G, *et al.* A hybrid joining technology for aluminum/ zinc coated steels in vehicles[J]. *Journal of Materials & Technology*, 2010, 26(9): 858-864.
- [2] Zhang H T, Liu J K. Microstructure characteristics and mechanical property of aluminum alloy/stainless steel lap joints fabricated by MIG welding-brazing process[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2011, 528(19): 6179-6185.
- [3] 吴铭方, 司乃潮, 王 敬. 铁/铝扩散偶界面反应层生长机理分析[J]. *焊接学报*, 2011, 32(5): 29-32.
Wu Mingfang, Si Naichao, Wang Jing. Analysis on growth mechanism on interfacial interlayer on Fe/Al couple[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2011, 32(5): 29-32.
- [4] 葛佳祺, 蒋 勇, 王克鸿. 包覆钎料铝-钢螺柱焊接头组织及性能[J]. *焊接学报*, 2012, 33(7): 97-100.
Ge Jiaqi, Jiang Yong, Wang Kehong. Microstructure characteristics and properties of steel to aluminum alloy made by covering filler metal brazing[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2012, 33(7): 97-100.
- [5] Liu X, Lan S, Ni J. Analysis of process parameters effects on friction stir welding of dissimilar aluminum alloy to advanced high strength steel[J]. *Materials & Design*, 2014(59): 50-62.
- [6] 杨 硕, 林 健, 雷永平, 等. 预置间隙对铝/钢 CMT 接头强度与失效模式的影响[J]. *焊接学报*, 2014, 35(6): 5-8.
Yang Suo, Lin Jian, Lei Yongping, *et al.* Influence of preset gap on strength and failure mode of steel/aluminum CMT joint[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2014, 35(6): 5-8.
- [7] Zhang W, Sun D, Han L, *et al.* Interfacial microstructure and mechanical property of resistance spot welded joint of high strength steel and aluminium alloy with 4047 AlSi12 interlayer[J]. *Materials & Design*, 2014(57): 186-194.
- [8] Kobayashi S, Yakou T. Control of intermetallic compound layers at interface between steel and aluminum by diffusion-treatment[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2002, 338(1): 44-53.

作者简介: 杨金龙,男,1988 年出生,博士研究生。主要从事新型焊接材料及新工艺方面的研究。发表论文 5 篇。Email: yangjinlong@163.com

通讯作者: 薛松柏,男,教授。Email: xuesb@nuaa.edu.cn