

参 考 文 献

- [1] 刘会杰. 焊接冶金与焊接性[M]. 北京:机械工业出版社, 2008:1-5.
- [2] 邵家鑫, 都 东. 基于X射线数字化图像处理的双面焊缝缺陷检测[J]. 焊接学报, 2010, 31(11), 21-24.
- [3] Daillant G, Micollet D, Paindavoine M. Defects in a weld: a complete Radiographies Processing Line[C]. Proceedings of the 1996 IEEE IECON 22nd International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation. Taipei,

China, 1992, 2: 719-724.

- [4] 杨 勇, 王 彬, 宋永伦. 计算机辅助铝合金焊缝X射线底片的缺陷检测与分类[J]. 电焊机, 2007, 37(6), 120-123.
- [5] 董明训. X射线数字图像焊接缺陷检测研究[D]. 济南: 山东大学硕士学位论文, 2011.
- [6] 张晓光, 高 顶. 射线检测焊接缺陷的提取和自动识别[M]. 北京:国防工业出版社, 2004, 142-160.

作者简介: 郭俊磊, 1987年出生, 硕士研究生, 主要从事焊接无损检测的研究。

铝合金/低碳钢 TIG 熔-钎焊接头界面分析及接头性能

合肥工业大学 材料科学与工程学院(230009) 孙玉萍 孙禹冲 李先芬

摘要 通过4043铝-硅焊丝实现了5052铝合金/Q235钢的钨极氩弧(TIG)熔-钎焊连接, 运用OM、SEM和EDS分析了界面层的宏微观结构特征及金属间化合物成分, 采用拉伸试验获得了焊接接头的断裂强度。研究结果表明: 焊缝/低碳钢交界处形成了薄厚不均的界面层, 钢侧坡口上部的界面层较厚, 下部的界面层较薄, 厚度范围为8~11 μm ; 根据界面层的微观形态和相组成不同将界面层分为两层, 靠近焊缝的I层为焊缝组织与金属间化合物交错生长的锁扣状, 由 $\tau_5\text{-Al}_{7.4}\text{Fe}_2\text{Si} + \tau_6\text{-FeAl}_4\text{Si} + \alpha(\text{Al})$ 相构成; 靠近钢侧的II层为致密的板块状, 由 $\theta\text{-FeAl}_3 + \eta\text{-Fe}_2\text{Al}_3 + \tau_5$ 相构成; 接头抗拉强度约为84 MPa, 焊缝/低碳钢界面层下部为连接的薄弱环节, 成为拉伸实验的起裂位置。

关键词: 钨极氩弧熔-钎焊 铝合金 低碳钢 界面层 力学性能
中图分类号: TG457.1

0 前 言

铝及铝合金具有密度低、耐腐蚀性能好、易加工等优势, 在国民经济建设中得到广泛应用, 特别是在汽车、船舶、航空航天等领域采用铝合金/钢一体化结构, 能够同时满足现代制造业对轻量化和结构性能的双重要求, 并且可以节约能源、减少环境污染, 因此受到人们的广泛关注^[1-2]。但是铝合金与钢的熔点、密度及线膨胀系数等存在很大差异, 导致两者之间的焊接性较差, 并且铁在固态铝中的固溶度很小, 接头中易形成脆性的Fe-Al金属间化合物, 迅速降低接头的力学性能^[3-4]。近年来出现的铝合金/钢熔-钎焊方法利用两种母材熔点的差异, 通过控

制热输入量, 在保证钢母材不发生熔化的情况下, 熔融的铝母材与填充金属一起在钢表面铺展, 通过原子扩散机制实现钢侧的钎焊连接以及铝侧的熔焊连接^[5]。

目前国内外的研究学者开发出了多种实现铝合金/钢熔-钎焊连接的热源, 如激光熔-钎焊、MIG熔-钎焊、TIG熔-钎焊、CMT熔-钎焊以及激光+MIG电弧复合熔-钎焊等。由于TIG熔-钎焊具有成本低、设备简单、易操作等优点, 因此在异种材料熔-钎焊实现过程中具有一定的优势^[1]。文中在获得铝合金/低碳钢TIG熔-钎焊接头的基础上, 对接头界面层的宏观与微观结构特征以及金属间化合物的相成分进行分析, 通过拉伸试验获得接头力学性能, 并对拉伸接头进行断裂分析, 为铝合金/低碳钢熔-钎焊的应用提供理论基础。

1 试验方法

1.1 试验材料

试验母材为 5052 铝合金及 Q235 低碳钢,母材厚

度均为 3.0 mm,填充材料选用 $\phi 3$ mm 的 4043 Al-Si 焊丝,钎剂为 Noclock 氟化物钎剂。两种母材及焊丝成分分别见表 1~3。

1.2 试验过程

表 1 5052 铝合金化学成分(质量分数,%)

Si	Cu	Mg	Zn	Mn	Cr	Fe	Al
≤ 0.25	≤ 0.10	2.2~2.8	≤ 0.10	≤ 0.10	0.15~0.35	≤ 0.40	余量

表 2 Q235 钢化学成分(质量分数,%)

C	Mn	Si	S	P	Fe
0.14~0.22	0.30~0.65	≤ 0.30	≤ 0.05	≤ 0.045	余量

表 3 4043 Al-Si 焊丝化学成分(质量分数,%)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al	其它
4.5~6.0	0.8	0.3	0.05	0.05	0.1	0.2	余量	0.05~0.15

后均匀地涂覆在钢坡口表面及钢坡口两侧上下表面各 10 mm 处,厚度以盖过钢板表面颜色为宜,焊件对接间隙为 2 mm 左右。采用标准交流 TIG 电源焊接,焊接工艺参数为焊接电流 130~140 A,电弧长度 3 mm,焊接速度为 120 mm/min,送丝速度为 300 mm/min,氩气流量为 10 L/min。

焊后沿焊缝横截面剖开,并用树脂封装好试样,依次用 320#、600# 等金相砂纸打磨,然后在抛光机上进行机械抛光至镜面,最后对金相试样进行腐蚀,其中铝合金母材及焊缝处用 Keller 试剂(1 mL HF+1.5 mL HCl+2.5 mL HNO₃+95 mL H₂O)腐蚀;钢母材侧用 4% 硝酸酒精腐蚀。采用金相显微镜(OM)观察接头宏观形貌,在扫描电镜(SEM)下分析接头微观组织特征,并用能谱仪(EDS)分析焊缝组织及界面层金属间化合物的化学成分;将焊件按 GB 2651—2008《焊接接头拉伸试验方法》加工成拉伸试样,在万能试验机上进行拉伸试验,拉伸速率为 2 mm/min。

2 试验结果及分析

2.1 TIG 熔-钎焊接头宏观结构特征

铝合金/低碳钢异种金属 TIG 熔-钎焊接头宏观形貌如图 1 所示,由接头横截面可以看出,在电弧热及钎剂的辅助作用下,熔化的铝合金母材及液态钎料在钢表面有很好的润湿铺展性,并且低熔点的铝合金与熔融的钎料共同构成了铝侧的熔焊接头,而高熔点的低碳钢未发生熔化,焊缝金属与钢之间依靠元素扩散及其物化反应形成钎焊连接。

将母材切割成 80 mm×50 mm 规格,焊前将母材对接面加工成非对称 V 形坡口,铝侧坡口角度为 30°,钢侧坡口角度为 45°,用细钢丝刷去除母材表面及坡口处的氧化膜,并用丙酮清洗表面油污;将钎剂用丙酮调和

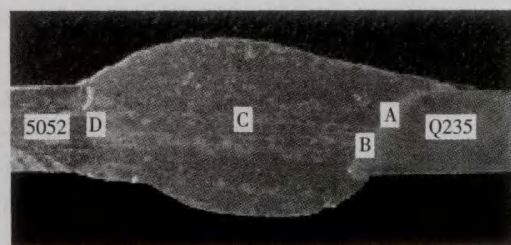
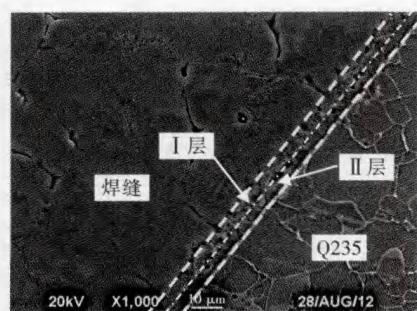


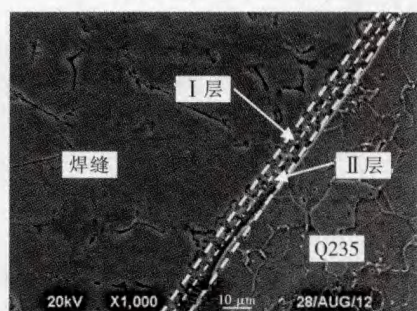
图 1 铝/钢 TIG 熔-钎焊接头横截面

2.2 TIG 熔-钎焊接头微观结构特征

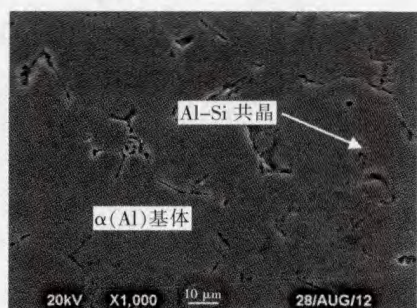
图 2 为熔-钎焊对接接头微观组织。图 2a~2b 为接头界面层组织特征,比较分析可知,在铝合金/低碳钢 TIG 熔-钎焊过程中,钢侧由于原子间的物化作用形成钎焊接头,钢母材与焊缝区之间形成一层厚度约为 8~11 μm 的金属间化合物,并且自顶部到底部界面层逐渐变薄。分析认为,在 TIG 熔-钎焊过程中,钢侧坡口上部距电弧较近,受到 TIG 电弧热量较多,液态钎料与固态钢反应充分,金属间化合物层较厚;而坡口下部距电弧较远,主要是通过液态钎料的热量传递^[6],在较低的温度下由于元素扩散不充分,形成的界面层比较薄,且易形成“未钎合”区,成为断裂源头。此外,根据微观组织形态不同将界面层分为两层,靠近焊缝一侧的 I 层为金属间化合物与焊缝组织交错生长的锁扣后均匀地涂覆在钢坡口表面及钢坡口两侧上下表面各 X 靠近钢侧的 II 层呈致密板块状。同时,在两层界面层之间存在缩孔等缺陷,这是由于焊接过程中熔池冷凝速度快,所采用的 Noclock 钎剂中的 KAlF₄ 成分在电弧高温作用下易水解^[7],产生的气体不易从焊缝中逸



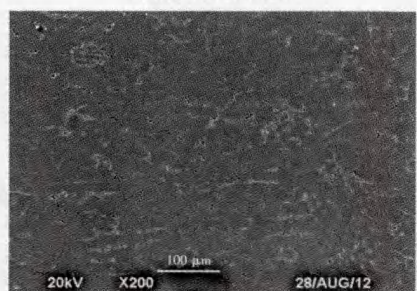
(a) A区界面微观组织



(b) B区界面微观组织



(c) C区微观组织



(d) D区微观组织

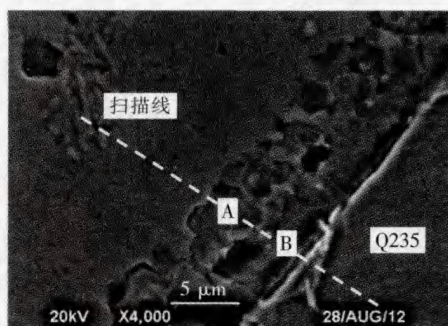
图2 铝/钢TIG熔-钎焊接头微观结构

出,从而在焊接接头中产生气孔等缺陷。熔融的铝-硅焊丝与铝合金母材混合后形成焊缝组织,焊缝微观组织形貌如图2c所示,焊缝组织以 $\alpha(\text{Al})$ 为基体,Al-Si共晶沿着基体相晶界析出。图2d为靠近铝合金母材的熔合区微观形貌,熔融的铝母材与液态钎料一起形成熔焊接头,由于采用的是Si含量约为5%的Al-Si焊

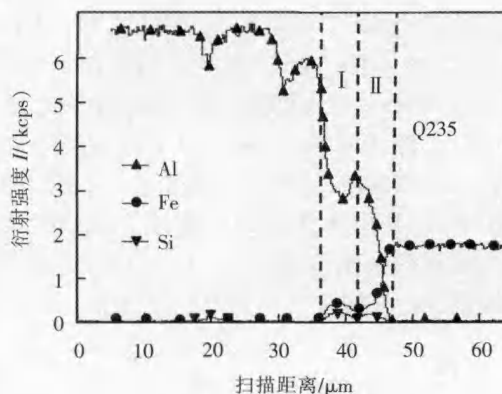
丝,因此在熔合区柱状晶晶界上分布着大量的Al-Si共晶。

2.3 金属间化合物组成

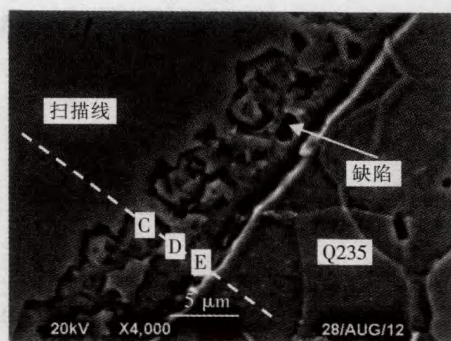
对TIG熔-钎焊接头金属间化合物层进行线扫描分析,结果如图3所示。由图3可以看出,在钎焊接头界面层处,Al,Fe元素分布均存在明显的变化,这是由于两种元素均向对方基体扩散,并且Al在Fe中的溶解度远大于Fe在Al中的溶解度^[8],因此Al元素向钢侧基体中的扩散更为明显;在靠近钢侧处Al,Fe元素均呈线性变化,而Si元素主要集中于焊缝晶界以及界面层处,并呈双峰状分布。对界面层元素分布进行定量分析,其结果如表4所示。针对Al-Si焊缝/低碳钢界面层,由于钎料中Si元素参与了金属间化合物的形成过程,结合Al-Fe-Si三元合金相图^[9-10]及能谱分析结果推测,I层金属间化合物的相组成为 $\tau_5\text{-Al}_{7.4}\text{Fe}_2\text{Si}$, $\tau_6\text{-FeAl}_4\text{Si}$ 和 $\alpha(\text{Al})$ 相,这是由于液态钎料中的Si元素取代了部分的Fe元素,与Al一起形成了初生 τ_5 相,而不是 $\theta\text{-FeAl}_3$ 和 $\eta\text{-Fe}_2\text{Al}_5$ 相;II层金属间化合物中固溶了较高含量的Si元素,其相组成为 $\eta\text{-Fe}_2\text{Al}_5 + \theta\text{-FeAl}_3 + \tau_5$,这是由于初生的 τ_5 相抑制了液态钎料与固态钢之间的元素扩散,并且II层的Al,Si元素均有所降低,从而在该界面层形成了快速生长的 η 相和 θ 相,而快速生长的 η 相导致Si元素在钢侧聚集从而与Al,Fe元



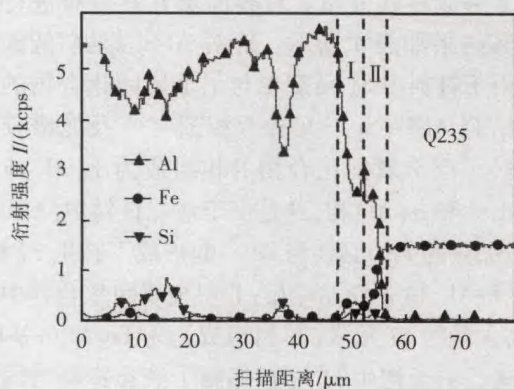
(a) 钢侧坡口上部显微组织



(b) 钢侧坡口上部线扫描结果



(c) 钢侧坡口下部显微组织



(d) 钢侧坡口下部线扫描结果

图3 金属间化合物层线扫描结果

表4 金属间化合物层的能谱分析结果(质量分数,%)

能谱点	Al	Fe	Si
A	74.98	16.23	8.79
B	51.63	40.93	7.44
C	56.15	27.83	9.33
D	75.92	11.48	6.52
E	40.75	48.67	4.96

素一起在部分区域形成 τ_5 相。

2.4 TIG 熔 - 钎焊接头力学性能

对 5052 铝合金/Q235 低碳钢 TIG 熔 - 钎焊接头进行拉伸试验,得到其平均抗拉强度约为 84 MPa,达到 5052 铝合金母材强度的 42% (其平均抗拉强度为 200 MPa)。通过对断裂接头进行分析发现,断裂起始位置为钢侧坡口底部区域,这一位置由于应力集中以及钎焊不充分,易引起裂纹萌生。裂纹沿着 I, II 层的交界处进行扩展,这是由于在这两层脆性的金属间化合物之间存在缩孔等缺陷,在拉伸应力作用下裂纹容易沿着焊接缺陷进行扩展。

3 结 论

(1) 采用 4043 Al-Si 焊丝获得了良好的 5052 铝合

金/Q235 钢 TIG 熔 - 钎焊接头,在铝合金母材侧为熔焊连接,钢母材侧为钎焊连接。焊缝/低碳钢交界处形成了一层薄厚不均的金属间化合物,该界面层的厚度自上而下逐渐变薄,厚度范围为 8 ~ 11 μm 。

(2) 界面层根据其形态特征及相组成不同分为两层,靠近焊缝侧为焊缝组织与金属间化合物交错生长的锁扣状,其相组成为 $\tau_5\text{-Al}_{7.4}\text{Fe}_2\text{Si} + \tau_6\text{-FeAl}_4\text{Si} + \alpha(\text{Al})$ 相,靠近钢侧呈致密的板块状,其相组成为 $\theta\text{-FeAl}_3 + \eta\text{-Fe}_2\text{Al}_5 + \tau_5$ 。

(3) 接头的平均抗拉强度约为 84 MPa,达到 5052 铝合金母材强度的 42%,钢侧坡口底部为连接的薄弱环节,成为断裂的起始位置,裂纹沿着两层化合物之间的焊接缺陷区进行扩展。

参 考 文 献

- [1] 苏玉虎,秦国梁,位延堂. 铝合金/钢异种金属熔 - 钎焊接技术研究进展[J]. 焊接, 2011(6): 9 - 15.
- [2] 陈树海,马柯,黄继华,等. 钢/铝异种金属双熔池 TIG 熔钎焊接头的显微组织与力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2012, 21(12): 3076 - 3081.
- [3] 宋建岭. 铝合金/不锈钢预涂层 TIG 熔 - 钎焊特性与界面行为研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学博士学位论文, 2010.
- [4] 李亚江. 焊接冶金学 - 材料焊接性[M]. 北京:机械工业出版社, 2007.
- [5] Lin Sanbao, Song Jianling, Yang Chunli, et al. Experimental study on dissimilar TIG welding - brazing of 5A06 aluminum alloy to SUS321 stainless steel[J]. China Welding, 2010, 19(1): 26 - 31.
- [6] 林三宝,宋建岭,杨春利,等. 铝合金/不锈钢钎焊极氩弧熔 - 钎焊接头界面层的微观结构分析[J]. 金属学报, 2009, 45(10): 1211 - 1216.
- [7] 张启运,庄鸿寿. 钎焊手册[M]. 北京:机械工业出版社, 1999.
- [8] 郭青蔚,王桂生,郭庚辰. 常用有色金属二元合金相图集[M]. 北京:化学工业出版社, 2010.
- [9] Maitra T, Gupta S P. Intermetallic compound formation in Fe-Al-Si ternary system; Part II[J]. Materials Characterization, 2002, 49(4): 293 - 311.
- [10] Li Y, Ochin P, Quivy A, et al. Enthalpy of formation of Al-Fe-Si alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2000, 49(4): 293 - 311.

作者简介: 孙玉萍,1990 年出生,硕士研究生,主要从事铝合金焊接以及铝合金低温耐蚀钎料的研究。