

DOI: 10.11973/jxgccl202112010

不同坡口面角度镀锌钢/铝合金激光熔钎焊接头的界面组织和拉伸性能

杨 扬, 周 信, 于 霜, 柏余杰, 吕亚男

(苏州工业职业技术学院机电工程系, 苏州 215104)

摘 要: 采用 ER4043 焊丝对 6061-T6 铝合金板和 AISI 1045 镀锌钢板进行激光熔钎焊, 铝合金板的坡口面角度为 30° , 钢板的坡口面角度分别为 30° 和 60° , 研究了钢侧钎焊界面的显微组织和微区成分, 测试了接头的拉伸性能。结果表明: 钢板坡口面角度为 60° 时接头在焊趾和焊根处的钎焊界面处均形成富锌区, 并出现微孔洞, 其他区域界面处形成了连续的金属间化合物层; 钢板坡口面角度为 30° 时接头仅在焊趾处形成富锌区, 整个钎焊界面处均形成了连续的金属间化合物层; 在 2 种接头中, 钢板坡口面下部区域的金属间化合物层厚度均较大, 并且钢板坡口面角度为 30° 时接头中的金属间化合物层厚度大于钢板坡口面角度为 60° 时的; 钢板坡口面角度分别为 30° , 60° 时, 接头的平均抗拉强度分别为 120.3, 151.7 MPa, 拉伸断裂均发生在钢/焊缝界面处, 均为解理断裂。

关键词: 激光熔钎焊; 铝合金; 镀锌钢; 金属间化合物; 拉伸性能

中图分类号: TG456.7

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2021)12-0055-07

Interface Microstructure and Tensile Properties of Different-Bevel-Angle Galvanized Steel/Aluminum Alloy Joint by Laser Fusion Brazing

YANG Yang, ZHOU Xin, YU Shuang, BAI Yujie, LÜ Yanan

(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Suzhou Vocational Institute of Industrial Technology, Suzhou 215104, China)

Abstract: 6061-T6 aluminum alloy plate and AISI 1045 galvanized steel plate were welded by laser fusion brazing with ER4043 welding wires; the bevel angle of the aluminum alloy plate was 30° , and that of the steel was 30° and 60° , respectively. The microstructure and micro-zone composition of the brazing interface on the steel side were studied, and the tensile properties of the joint were tested. The results show that zinc-rich areas and microvoids were formed at weld toe and weld root on the brazing interface of the joint when the bevel angle of steel plate was 60° , and a continuous intermetallic compound layer was formed at other areas on the interface. For the joint with the steel plate bevel angle of 30° , zinc-rich areas were only formed at the weld toe, and a continuous intermetallic compound layer was formed at the entire brazing interface. In the two joints, the thickness of the intermetallic compound layer on the lower area of the steel plate groove surface was higher. The thickness of the intermetallic compound layer in the joint with the steel plate bevel angle of 30° was greater than that with the steel plate bevel angle of 60° . The average tensile strength of joints with the steel bevel angles of 30° and 60° was 120.3, 151.7 MPa, respectively. The two joints fractured at the steel/weld interface during tension, and both fractured in cleavage fracture form.

Key words: laser fusion brazing; aluminum alloy; galvanized steel; intermetallic compound; tensile property

0 引 言

铝合金/钢复合结构能够充分发挥两种材料各

自的性能优势, 具有轻质、高强等优点, 在车辆、船舶、航天航空等领域具有很好的应用前景。然而, 铝和钢的热物理性能(熔点、热导率、热膨胀系数等)差异很大, 且二者之间因固溶度低而易形成硬脆的 Fe-Al 金属间化合物^[1-2], 使得两种金属的连接成为

收稿日期: 2020-08-14; 修订日期: 2021-07-12

作者简介: 扬扬(1982—), 男, 山西临汾人, 讲师, 博士

一个技术难点。熔钎焊是一种较理想的焊接方法,可通过熔化铝合金和填充金属,润湿钢的表面而形成熔钎焊焊缝,从而实现钢和铝合金的连接。激光因具有能量密度高、加热和冷却速率快等优点,广泛用作铝/钢熔钎焊的热源^[3]。

近年来,学者们对铝/钢异种金属激光熔钎焊的研究多聚焦于搭接接头^[4-5],而对对接接头的关注较少。这是由于激光为局部热源,对接焊接时熔池的铺展性较差,导致接头强度较低。然而,采用对接方式有利于焊接结构件的后续加工,还可以避免搭接方式带来的板材浪费问题。研究表明,热源组合方式^[6-7]、工艺参数^[8]、填料^[9]等因素均会对铝/钢异种金属激光熔钎焊对接接头的力学性能产生影响。此外,母材预制坡口的坡口面角度也是一项重要影响因素^[10]。坡口面角度直接关系到母材不同区域与激光热源中心的相对位置,以及钎焊界面的连接面

积。钢/焊缝金属界面一直是铝/钢异种金属激光熔钎焊对接接头的薄弱位置。因此,研究不同坡口面角度钢/铝异种金属熔钎焊对接接头钎焊界面的显微组织,对改善接头的力学性能有一定的实际意义。为此,作者采用填丝激光熔钎焊方法对 6061-T6 铝合金板和 AISI 1045 镀锌钢板进行异种金属对接焊试验,对比研究了不同坡口面角度下钎焊界面的显微组织和接头的拉伸性能。

1 试样制备与试验方法

1.1 试样制备

试验母材选用 6061-T6 铝合金板和表面热镀锌的 AISI 1045 钢板(镀层厚度在 $7\sim 8\ \mu\text{m}$)。母材试样的尺寸均为 $3\ \text{mm}\times 70\ \text{mm}\times 100\ \text{mm}$ 。焊接材料为 AWS A5.10 ER4043 铝合金焊丝,直径为 $1.2\ \text{mm}$ 。母材和焊丝的化学成分见表 1。

表 1 母材和填充焊丝的化学成分

Table 1 Chemical composition of base metals and filler wire

材料	质量分数													
	C	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Be	Al	S	P	Ni	Cr
6061 铝合金		0.52	0.26	0.21	0.06	0.95	0.17			余				0.12
AISI 1045 钢	0.45	0.30	余	0.15	0.70						0.025	0.030	0.18	0.20
ER 4043 焊丝		5.0	0.15	0.13	0.02	0.02	0.05	0.10	0.000 3	余				

采用对接接头形式,开 V 形坡口(带铜垫板),无钝边,铝合金板试样的坡口面角度为 30° ,钢板试样的坡口面角度分别为 30° 和 60° 。焊前使用砂纸打磨母材试样,并用丙酮清洗,以除去氧化膜和油脂。采用 IPG YLS-10000 型光纤激光器进行激光熔钎焊,由 Fronius Trans Plus Synergic 5000 型焊机完成送丝工序。如图 1 所示:焊丝位于激光头前部,与激光束移动方向一致;保护气体为氩气,分别进行侧吹和背吹;为了提升焊丝与铝合金母材的冶金连接效果,将激光聚焦于铝合金板坡口面上。焊接时的激光功率为 $5.2\ \text{kW}$,光斑直径为 $1.2\sim 1.5\ \text{mm}$,焊接速度为 $0.8\ \text{m}\cdot\text{min}^{-1}$,送丝速度为

$9.7\ \text{m}\cdot\text{min}^{-1}$,氩气流量分别为 $20\ \text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ (侧吹)和 $5\ \text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ (背吹)。将钢板坡口面角度分别为 30° 和 60° 条件下制备的接头分别简称为 30° 坡口面接头和 60° 坡口面接头。

1.2 试验方法

在焊接接头上垂直于焊接方向线切割取样,用环氧树脂制成镶块金相试样,分别用砂纸和二氧化硅胶体溶液研磨和抛光后,先用 Keller 试剂($1\%\ \text{HF}+1.5\%\ \text{HCl}+2.5\%\ \text{HNO}_3+95\%\ \text{H}_2\text{O}$,体积分数)腐蚀焊缝和铝合金板母材(时间 $3\ \text{s}$),再用体积分数 4% 的硝酸酒精溶液腐蚀钢板母材,采用 Olympus SZ61 型立体光学显微镜(OM)观察截面低倍组织,利用 JSM-7600F 型扫描电子显微镜(SEM)观察钢板和焊缝界面处的截面显微组织和形貌,使用附带的能谱仪(EDS)进行微区成分分析。

以焊缝为中心,垂直于焊接方向截取尺寸如图 2 所示的拉伸试样,试样厚度为 $3\ \text{mm}$,在 Zwick-T1-FR020TN-A50 型标准拉伸试验机上进行室温拉伸试验,拉伸速度为 $0.5\ \text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 。使用 JSM-7600F 型扫描电子显微镜观察拉伸断口形貌。

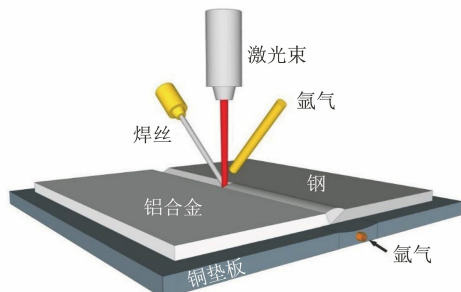


图 1 激光熔钎焊示意

Fig. 1 Schematic of laser fusion brazing

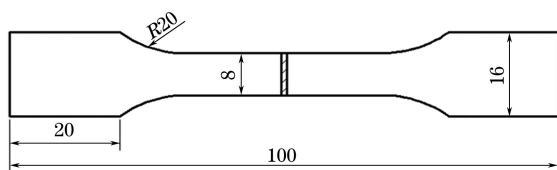


图2 拉伸试样尺寸

Fig. 2 Size of tensile specimen

2 试验结果与讨论

2.1 焊缝表面和横截面宏观形貌

由图3可以看出,焊接接头焊缝表面光滑平整,无明显飞溅物,铝合金/焊缝界面呈现波浪状。在焊

根处,熔体会从V型坡口底部向钢板背部流淌,形成背面焊缝,如图中区域A和区域G所示;超出母材表面的熔体会铺展到钢板上表面,如图中区域F和区域L所示。

在激光熔钎焊过程中,钢板表面镀锌层的熔点较低(419.5℃),受热后熔化并与由铝合金焊丝和铝合金母材熔化形成的熔池混合;进入熔池的锌元素能够降低熔池金属的表面张力,有助于熔池金属在钢板表面的铺展^[11-12],同时还能够破坏氧化层,抑制铝元素氧化,从而进一步促进熔池在钢板表面的铺展^[13]。

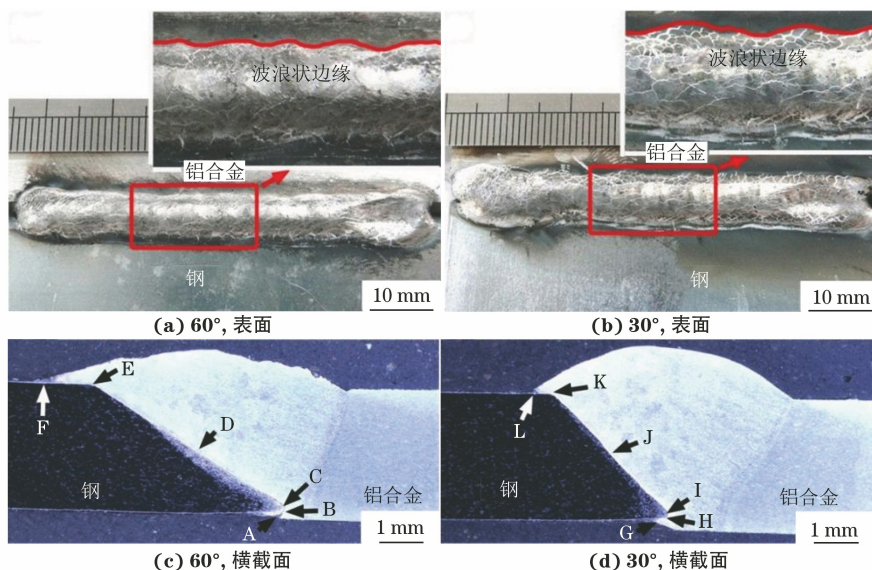


图3 不同坡口面角度钢板/铝合金板焊接接头焊缝表面和横截面宏观形貌

Fig. 3 Macromorphology of weld surface (a—b) and cross-section (c—d) of welded joints of different-bevel-angle steel plate/aluminum alloy plate

2.2 界面显微组织

采用铝合金焊丝激光熔钎焊铝合金/钢接头时,其钢/焊缝界面处会形成 Fe_3Al 、 FeAl 、 FeAl_2 、 Fe_2Al_5 和 FeAl_3 等5种金属间化合物,其中最常见的是 Fe_2Al_5 和 FeAl_3 , Fe_2Al_5 通常在钢侧形成, FeAl_3 在焊缝侧形成^[2,14]。通过EDS测定微区成分,再结合Fe-Al相图及相关研究结果,可以定性推断Fe-Al金属间化合物的大致种类^[10]。

由图4和表2分析可知,在60°坡口面接头中,钢板母材没有明显的熔化迹象,靠近钢/焊缝界面的焊缝组织主要为枝晶组织。焊根(区域A和区域B)和焊趾(区域F)处存在一些微米级的孔洞,未见连续的界面层;区域A(位置1,2)、区域B(位置3)和区域F(位置6,7)均主要由铝元素和锌元素组成,均为富锌区,推测形成了以 $\alpha\text{-Al}$ 为基体相的 $\alpha\text{-Al}+\beta\text{-Zn}$ 双相组织^[2]。在激光熔钎焊过程中,熔池

金属铺展至钢板上表面时,前端部分会与熔化的镀锌层混合,其中一部分锌会溶入熔池中,另一部分会形成锌蒸气而从熔池逃逸至最前端。锌元素与铝元素的亲和力大于其与铁元素^[2],因此熔池中的锌元素倾向于与铝元素结合,形成 $\alpha\text{-Al}+\beta\text{-Zn}$ 双相组织;同时,由于熔池凝固速率过快,部分锌蒸气未能完全逃逸而留在焊缝中形成微气孔^[2]。区域C、区域D和区域E都形成了连续的钎焊界面层。其中:区域C的钎焊界面层厚度约为4 μm ,主要由铝、铁、硅3种元素组成(位置4),原子比约为12.7:4.3:1,推测形成了 Fe_2Al_5 和 FeAl_3 金属间化合物,硅元素应是来自ER4043铝合金焊丝,取代铝元素而固溶于 Fe_2Al_5 和 FeAl_3 中^[2,14];焊缝侧的金属间化合物层呈锯齿状伸入焊缝中,表明焊接过程中金属间化合物由钢侧向液态熔池中生长。区域D和区域E的钎焊界面层厚度约为2 μm ,焊缝侧不均匀分布着一些

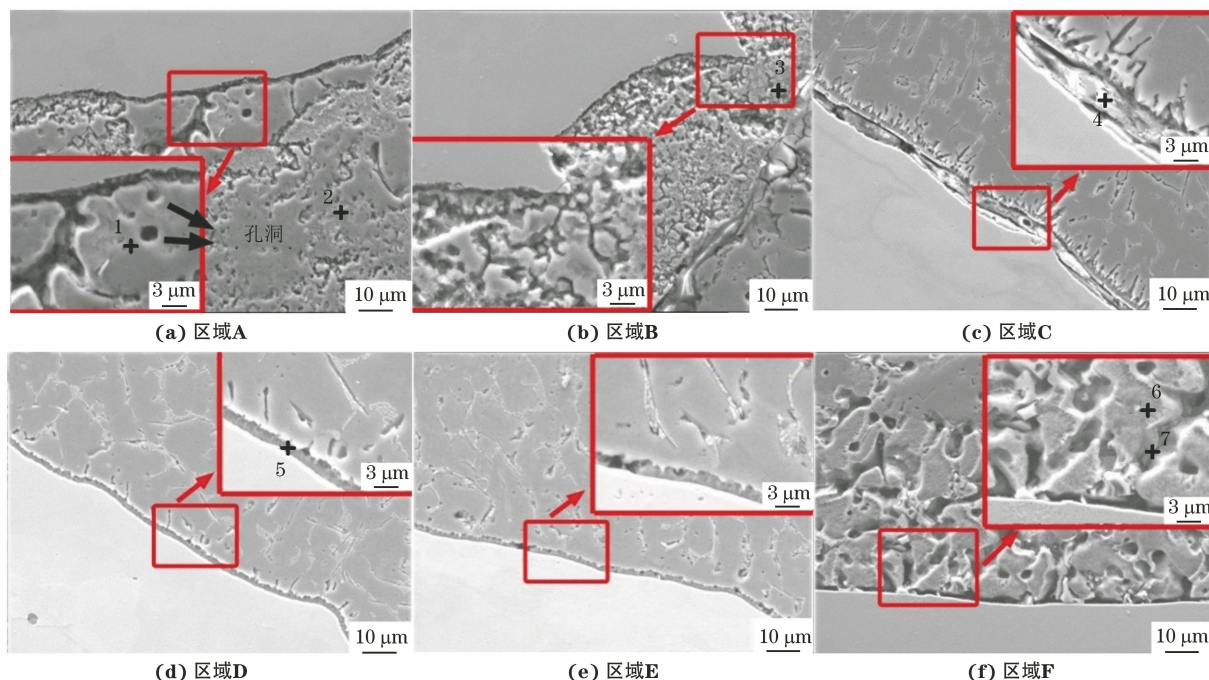


图 4 60°坡口面接头截面不同区域(如图 3 所示)的微观形貌

Fig.4 Micromorphology of different zones (shown in Fig.3) on cross-section of 60°-bevel-angle joint:

(a) zone A; (b) zone B; (c) zone C; (d) zone D; (e) zone E and (f) zone F

表 2 图 4 中不同位置 EDS 分析结果

Table 2 EDS analysis results at different spots in Fig.4

位置	原子分数				/%
	Al	Si	Fe	Zn	
1	91.26	0.81	0.48	7.45	
2	86.34	0.75	1.02	11.89	
3	84.12	1.39	3.12	11.37	
4	70.40	5.53	23.83	0.24	
5	80.62	3.05	14.03	2.30	
6	83.84	0.86	0.35	14.95	
7	75.20	1.53	0.36	22.91	

针状结构;区域 D 处的界面层主要由铝、铁、硅和少量锌元素组成(位置 5),前 3 种元素的原子比约为 26.4:4.6:1,推测主要形成了 α -Al 及 Fe_2Al_5 和 FeAl_3 金属间化合物,硅元素固溶于金属间化合物。区域 C、区域 D 和区域 E 处的钢板母材坡口面没有镀锌层,钢直接与熔池金属接触,通过反应扩散形成金属间化合物。激光束直接聚焦于铝合金板坡口面,钢板母材中区域 C 最靠近热源,温度较高,元素扩散较快,金属间化合物形核和生长的能量较充足,因此此区域的金属间化合物层较厚^[15]。

由图 5 和表 3 分析可知,在 30°坡口面接头中,钢板母材没有明显的熔化迹象,界面所有区域都形成了连续金属间化合物层。焊根(区域 G)处钢侧

金属间化合物层主要由铝和铁元素组成,从母材向焊缝方向铝铁原子比依次为 1.26:1(位置 1),1.86:1(位置 2),2.49:1(位置 3),推测依次为 FeAl 、 Fe_2Al_5 和 FeAl_3 相;焊缝侧金属间化合物层呈层片状,暗色相(位置 4)的主要成分(原子分数)为 75.84% Al,23.36% Fe,推测形成了 FeAl_3 相,白色相(位置 5)主要成分为铝,应为 α -Al 相,铝含量沿 ab 线发生显著波动,这与由不同相组成的层片状结构吻合。焊根区域的锌含量很低,与 60°坡口面接头焊根区域的差异很大,推测是由于坡口面较陡以及激光束对熔池的扰动,使得熔池金属流淌到钢板背面时先将液态锌推开,直接与钢发生反应扩散形成金属间化合物层,并且因冷却速率过快而与液态锌熔合很少。区域 H 的金属间化合物层厚度约为 16.5 μm ,近焊缝侧金属间化合物层中存在许多粗大针状组织。区域 I 的金属间化合物层厚度约为 14.0 μm ,金属间化合物层比较平整,主要由铝和铁元素组成,硅和锌元素含量较低,从钢向焊缝方向铝铁原子比依次为 1.92:1(位置 6),2.83:1(位置 7),3.19:1(位置 8),推测主要形成了 Fe_2Al_5 和 FeAl_3 相。区域 J 和区域 K 的金属间化合物层厚度分别约为 5.0,4.6 μm ,金属间化合物层在靠近焊缝侧都形成了针状组织。区域 J 处的金属间化合物层也主要由铝和铁元素组成,从钢向焊缝方向,铝铁原子比依次为 3.26:1(位置 9),

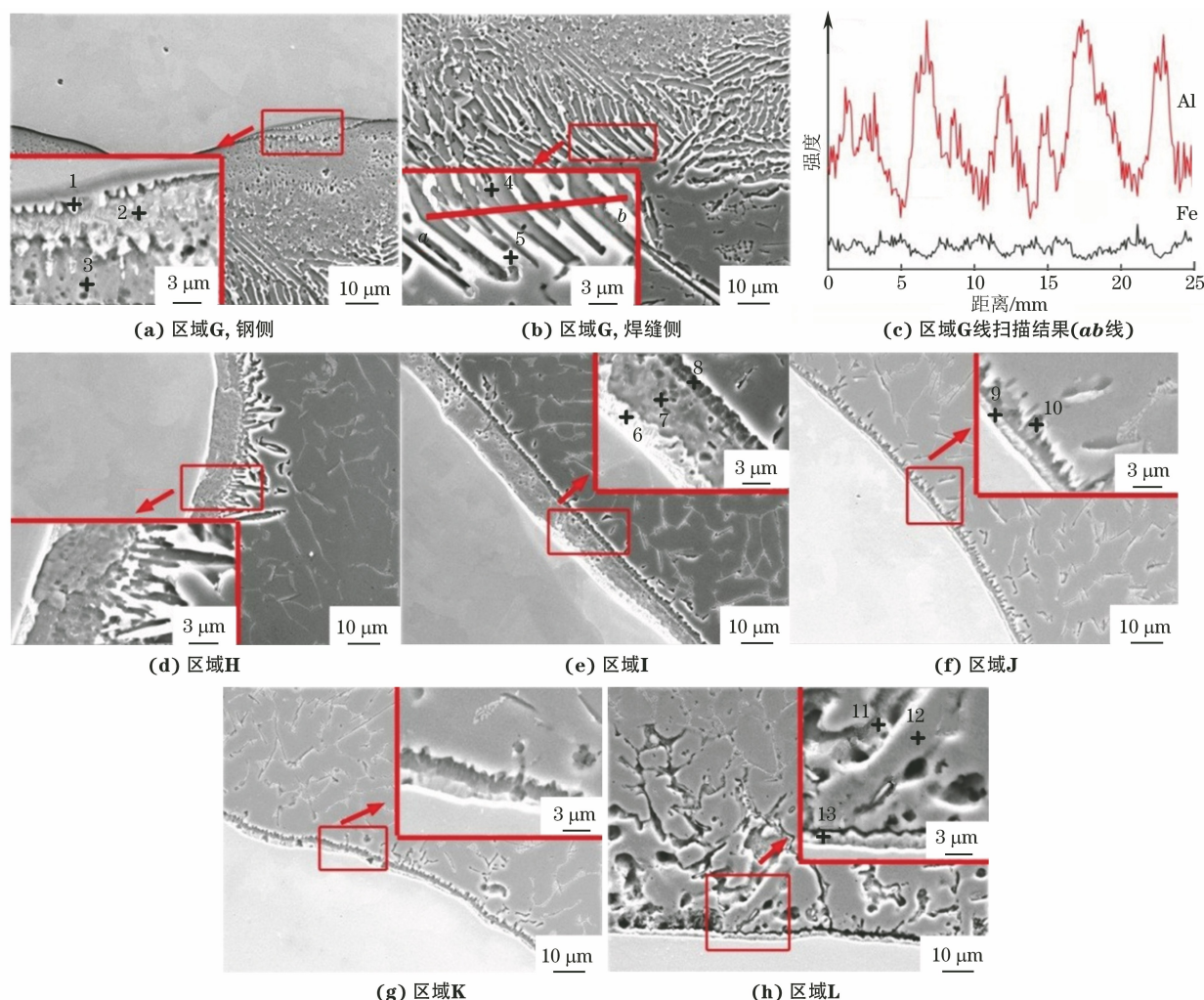


图 5 30°坡口面接头截面不同区域(如图 3 所示)的微观形貌及区域 G 线扫描结果

Fig. 5 Micromorphology of different zones (shown in Fig. 3) (a—b, d—h) and element linear scanning results in zone G (c) on cross-section of 30°-bevel-angle joint: (a) zone G, on steel side; (b) zone G, on weld side; (d) zone H; (e) zone I; (f) zone J; (g) zone K and (h) zone L

表 3 图 5 中不同位置的 EDS 分析结果

Table 3 EDS analysis results at different spots in Fig. 5

位置	原子分数				%
	Al	Si	Fe	Zn	
1	54.93	1.50	43.57	—	
2	63.69	1.27	34.22	0.82	
3	70.20	1.20	28.14	0.46	
4	75.84	0.80	23.36	—	
5	96.40	1.25	1.88	0.47	
6	64.52	1.60	33.55	0.33	
7	72.19	1.72	25.55	0.54	
8	74.30	2.17	23.32	0.21	
9	70.94	5.82	21.74	1.50	
10	73.13	3.20	22.55	1.12	
11	88.72	1.41	—	9.87	
12	92.90	1.68	—	5.42	
13	70.62	5.11	22.48	1.79	

3.24:1(位置 10),推测主要形成了 Fe_2Al_5 和 FeAl_3 相。焊趾(区域 L)处与金属间化合物层相邻的焊缝区域主要由铝和锌元素组成,原子比为 8.99:1(位置 11),17.14:1(位置 12),推测形成了以 $\alpha\text{-Al}$ 为基体的 $\alpha\text{-Al}+\beta\text{-Zn}$ 双相组织;该金属间化合物层厚度约为 $2\text{ }\mu\text{m}$,界面呈锯齿状,其主要元素铝、铁、硅的原子比约为 13.82:4.40:1(位置 13),推测主要形成了 Fe_2Al_5 相,硅元素固溶于该相。

在激光熔钎焊过程中,熔池金属铺展至钢板上表面并与液态锌混合,进而与钢板接触。进入熔池的锌元素倾向于与铝元素形成 $\alpha\text{-Al}+\beta\text{-Zn}$ 双相组织,而抑制铁元素扩散进熔池与铝元素反应,同时铁原子从钢板/熔池界面逐渐扩散到熔池中,当界面处铁元素的含量达到一定值时,就会满足 Fe-Al 金属间化合物形核和生长的一个必要条件。与 60°坡口面接头相比,30°坡口面接头的坡口面较陡,使得焊

趾区域(区域 L)更靠近热源中心,从而加速铁元素的扩散,并为金属间化合物形成提供更多能量。推测 30°坡口面接头钎焊界面满足金属间化合物形核和生长的条件,形成了连续的金属间化合物层,而 60°坡口面接头钎焊界面部分区域未满足金属间化合物形核和生长条件。

30°坡口面接头钢/焊缝界面的金属间化合物层厚度明显大于 60°坡口面接头。这是由于 30°坡口面接头中钢板的坡口角度较小,一方面使钢板坡口面更靠近热源中心,增大了热输入,另一方面大幅减小了焊缝容积,提高了热传导效率,更利于金属间化合物的形核和生长。

2.3 拉伸性能

在拉伸试验中,2 种接头均在钢板侧钎焊界面处

发生断裂,如图 6 所示。2 种接头的拉伸断口均呈现台阶和河流状花纹特征,还出现了撕裂棱,如图 7 所示,说明接头发生了典型的解理脆性断裂。测得 60°坡口面接头的平均抗拉强度达到 151.7 MPa,高于 30°坡口面接头的 120.3 MPa。

2 种接头钢板侧的钎焊界面处均形成了 Al-Fe 金属间化合物层,这种金属间化合物层对接头力学性能影响较大^[1-2];金属间化合物层厚度过大易导致脆断,过薄则会造成结合不良^[16]。30°坡口面接头钎焊界面局部区域的金属间化合物层厚度超过 10 μm ,而 60°坡口面接头钎焊界面的金属间化合物层厚度控制较好,因此后者的抗拉强度更高。此外,坡口面角度增大还可以增加钎焊界面的连接面积,从而增强接头的强度^[10]。

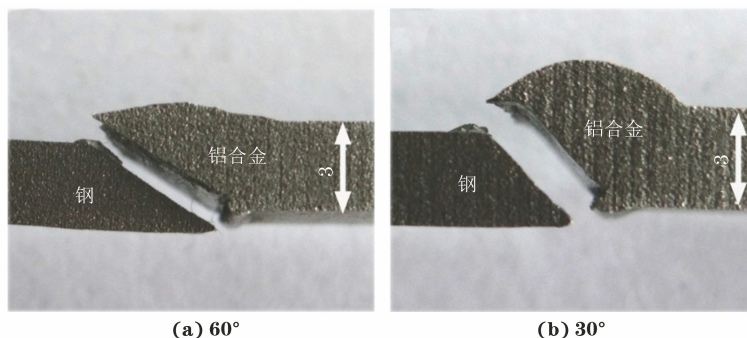


图 6 60°和 30°坡口面接头的拉伸断裂照片

Fig. 6 Images of 60°-bevel-angle and 30°-bevel-angle joints after tensile fracture

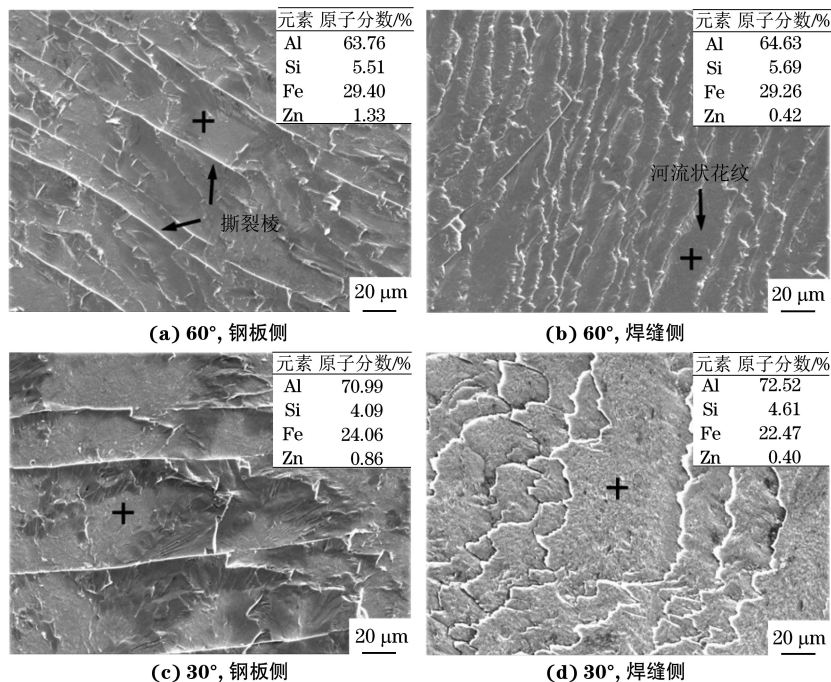


图 7 不同坡口面角度钢板/铝合金板焊接接头拉伸断口形貌

Fig. 7 Tensile fracture morphology of welded joints of different-bevel-angle steel plate/aluminum alloy plate:

(a, c) at steel plate side and (b, d) at weld side

3 结 论

(1) 采用 ER4043 铝合金焊丝对坡口面角度为 30° 的铝合金板和坡口面角度分别为 30° 和 60° 的镀锌钢板进行激光熔钎对接焊, 所得接头焊缝成形良好, 表面无明显飞溅物, 截面未见明显缺陷。

(2) 60° 坡口面接头在焊趾和焊根处的钢/焊缝界面处均形成富锌区, 并出现微孔洞, 其他区域界面处形成了连续金属间化合物层; 30° 坡口面接头仅在焊趾处形成富锌区, 并且整个钢/焊缝界面处均形成了连续金属间化合物层; 2 种接头中, 钢板坡口面下部区域的金属间化合物层厚度较大, 上部区域的金属间化合物层厚度较小, 并且 30° 坡口面接头钢侧钎焊界面的金属间化合物层厚度大于 60° 坡口面接头。

(3) 30° 坡口面接头和 60° 坡口面接头的平均抗拉强度分别为 120.3, 151.7 MPa, 拉伸断裂均发生在钢/焊缝界面处, 断口均呈典型的解理断裂特征。

参考文献:

- [1] KATAYAMA S. Laser welding of aluminium alloys and dissimilar metals[J]. *Welding International*, 2004, 18(8): 618-625.
- [2] AGUDO L, EYIDI D, SCHMARANZER CH, et al. Intermetallic Fe_xAl_y -phases in a steel/Al-alloy fusion weld[J]. *Journal of Materials Science*, 2007, 42(12):4205-4214.
- [3] 陈树海, 黄继华, 陈彦宾. 异种合金激光熔钎焊技术的现状与展望[J]. *焊接*, 2011(4):27-33.
CHEN S H, HUANG J H, CHEN Y B. The present situation and prospect on laser welding-brazing of dissimilar alloys[J]. *Welding*, 2011(4):27-33.
- [4] KOUADRI-DAVID A. Study of metallurgic and mechanical properties of laser welded heterogeneous joints between DP600 galvanised steel and aluminium 6082 [J]. *Materials and Design*, 2014, 54:184-195.
- [5] 袁锐, 邓胜杰, 崔海超, 等. 铝-钢异质金属双光束激光焊接 IMC 层迁移行为及对界面性能的影响[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(6):33-40.
YUAN R, DENG S J, CUI H C, et al. Characterization on IMC layer migration and interface properties in dual-beam laser welding of AA7075/DP590 alloys [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(6):33-40.
- [6] MOHAMMADPOUR M, YAZDIAN N, YANG G, et al. Effect of dual laser beam on dissimilar welding-brazing of aluminum to galvanized steel[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 98:214-228.
- [7] 朱宗涛, 万占东, 薛珺予. 不锈钢/铝合金异种金属激光-MIG 熔钎焊工艺研究[J]. *材料导报*, 2017, 31(12):52-55.
ZHU Z T, WAN Z D, XUE J Y. Research on laser-MIG fusion-brazing welding of stainless steel/aluminum dissimilar metals [J]. *Materials Review*, 2017, 31(12):52-55.
- [8] 李猛, 陈树海, 杨磊磊, 等. 铝合金/碳钢激光-TIG 复合热源熔钎焊工艺与接头显微结构分析[J]. *焊接学报*, 2016(12):21-24.
LI M, CHEN S, YANG L L, et al. Laser-TIG hybrid welding-brazing process of aluminum alloy/carbon steel and analysis of microstructures [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2016, 37(12):21-24.
- [9] 李妍, 刘宁, 黄健康, 等. 添加不同合金粉末激光熔钎焊铝/钢异种金属接头的组织与性能[J]. *机械工程材料*, 2018, 42(6): 30-35.
LI Y, LIU N, HUANG J K, et al. Structure and property of aluminum-steel dissimilar metal joint by laser fusion brazing with addition of different alloy powders [J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2018, 42(6):30-35.
- [10] 张建勋, 江旭, 徐甄真, 等. 6061-T6 铝合金/SPCC 冷轧钢激光熔钎焊特性研究[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(6):41-49.
ZHANG J X, JIANG X, XU Z Z, et al. Study on characteristics of laser welding-brazing of 6061 aluminum alloy to SPCC cold rolled steel [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(6):41-49.
- [11] LIU J, JIANG S C, SHI Y, et al. Effects of zinc on the laser welding of an aluminum alloy and galvanized steel [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 224: 49-59.
- [12] YAGATI K P, BATHE R N, RAJULAPATI K V, et al. Fluxless arc weld-brazing of aluminium alloy to steel [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(12): 2949-2959.
- [13] GATZEN M, RADEL T, THOMY C, et al. The role of zinc layer during wetting of aluminium on zinc-coated steel in laser brazing and welding [J]. *Physics Procedia*, 2014, 56: 730-739.
- [14] WALLERSTEIN D, SOLLA E L, LUSQUINOS F, et al. Advanced characterization of intermetallic compounds in dissimilar aluminum-steel joints obtained by laser welding-brazing with AlSi filler metals [J]. *Materials Characterization*, 2021, 179:111345.
- [15] HSIEH M J, LEE R T, CHIOU Y C. Friction stir spot fusion welding of low-carbon steel to aluminum alloy [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 240:118-125.
- [16] SONG J L, LIN S B, YANG C L, et al. Effects of Si additions on intermetallic compound layer of aluminum-steel TIG welding-brazing joint [J]. *Journal of Alloys & Compounds*, 2009, 488(1):217-222.