

冷喷涂 Cu 涂层辅助铝/钢异种金属电阻热扩散 连接工艺分析

于江^{1,2}, 杜荣茂², 范彦龙², 葛福琛², 余果², 张洪涛², 杨涛¹

(1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 宁波, 315201; 2. 哈尔滨工业大学, 材料结构精密焊接与连接全国重点实验室, 哈尔滨, 150001)

摘要: 基于冷喷涂技术预先在不锈钢基体表面制备 Cu 涂层作为中间层, 再通过电阻热扩散连接方式与铝合金相连, 并借助相关分析测试方法探究 Cu 涂层厚度对焊接接头界面组织和力学性能的影响。结果表明, 冷喷涂预先制备的 Cu 涂层和不锈钢基体间形成较好的冶金结合, 在后续的电阻热扩散连接过程中, Cu 涂层作为中间层将原有的铝—钢连接转换为铝—铜连接, 有效阻止了 Al-Fe 相互扩散。当 Cu 涂层厚度为 100 μm 时, 无缺陷的反应层被形成在铝合金和 Cu 涂层之间, 其主要成分为 Al(s.s) 和少量的 Al_2Cu , 此时接头拉剪载荷最大, 为 755.39 N, 断裂位置位于反应层处, 但接头载荷会随 Cu 涂层厚度增加逐渐降低, 这是因为增加的 Cu 涂层厚度提高接头电阻, 形成更高的温度场, 导致反应层因生成较多 Al-Cu 金属间化合物形成裂纹等焊接缺陷。

创新点: (1) 基于冷喷涂和电阻热扩散连接复合方式获得铝/钢异质结构。

(2) 通过冷喷涂制备的 Cu 涂层将后续电阻热扩散连接中原有的 Al-Fe 连接转变为 Al-Cu 连接。

(3) 通过高电阻率石墨形成的焦耳热促进连接界面处 Al-Cu 原子的相互扩散和冶金反应。

关键词: 冷喷涂; 不锈钢; 铝合金; 反应层

中图分类号: TG 453 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20231028001

Process analysis on resistance thermal diffusion welding Al/steel dissimilar metals assisted by cold spray Cu coating

YU Jiang^{1,2}, DU Rongmao², FAN Yanlong², GE Fuchen², YU Guo²,
ZHANG Hongtao², YANG Tao¹

(1. Ningbo Institute of Materials Technology & Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo, 315201, China; 2. State Key Laboratory of Precision Welding & Joining of Materials and Structures, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001, China)

Abstract: Based on the cold spray technology, the Cu coating was prepared on the surface of the stainless steel substrate as an interlayer in advance, then connected to the Al alloy by resistance thermal diffusion welding. The influence of the thickness of the Cu coating on the interface structure and mechanical properties of the final joint was discussed utilizing relevant analysis methods. The results indicated that a good metallurgical bond was formed between the pre-prepared Cu coating and the stainless steel substrate by cold spray technology. In the subsequent resistance thermal diffusion welding process, the Cu coating acted as an interlayer to effectively prevent the interdiffusion of Al and Fe elements, which was attributed to the interlayer converting the original Al-steel connection into Al-Cu connection. When the Cu coating thickness was 100 μm , a defect-free reaction layer was generated between the Al alloy and the Cu coating. The main component was Al(s.s) and a small amount of Al_2Cu in the reaction

收稿日期: 2023 – 10 – 28

基金项目: 国家自然科学基金 (U22B20127); 国家自然科学基金 (52175305); 以及泰山学者建设工程资助 (ctstp20230618); 济宁市全球揭榜项目 (2022JBZP004)

layer. The tensile shear load of the joint reached 755.39 N, and the fracture position was located at the reaction layer. However, the tensile shear load of the joint gradually decreased due to the increase of the Cu coating thickness because the increased Cu coating thickness increased the joint resistance, forming a higher temperature field in the welding process, which led to welding defects such as cracks in the reaction layer due to the formation of more Al-Cu intermetallic compounds.

Highlights: (1) A composite method of cold spraying and resistance thermal diffusion welding is proposed to obtain the Al/steel hybrid structure.

(2) The pre-prepared Cu coating via cold spraying technology transforms the original Al-Fe connection into an Al-Cu connection in the subsequent resistance thermal diffusion welding process.

(3) The Joule heat formed by high-resistivity graphite promotes the interdiffusion and metallurgical reaction of Al-Cu atoms at the final interface.

Key words: cold spray; stainless steel; Al alloy; reaction layer

0 序言

铝及铝合金作为轻金属材料之一, 具有比强度高、良好的导电和导热性等一系列特点, 被广泛应用于航空航天、轨道交通、汽车制造等重要工业领域^[1-2], 因此, 铝及铝合金与其他异种金属的高质量连接成为国内外学者的研究重点, 其中, 铝/钢复合结构备受关注^[3-5].

电阻焊作为一种高效高质量的连接技术, 被广泛应用于铝/钢异种金属连接^[6-7], 由于铝/钢异种金属在熔点、热膨胀系数、热导率等物理和化学性质差异较大, 且在焊接过程中铝/钢连接界面处易生成脆性的 Fe-Al 金属间化合物, 影响接头性能, 导致铝/钢复合结构质量难以满足使用需求^[8]. 相关文献^[9-10]表明铝/钢异种金属间嵌入合适的中间过渡层, 可有效抑制 Fe-Al 金属间化合物的生成, 是提高铝/钢接头性能的重要方法之一. Long 等人^[11]提出在铝合金表面预制 Ni-Zn-Si 复合粉末, 再通过激光焊实现与 DC04 钢的连接, 结果表明, 预先制备的粉末有效阻止焊接过程中 Fe 元素和 Al 元素的接触, 显著提高接头强度, 接头最高线载荷达到 165.24 N/mm; Chen 等人^[12]提出以 Cu 箔为中间层, 通过激光焊的方式实现 Q235 低碳钢和 5052 铝合金的连接, 结果表明, Cu 中间层的加入可有效改善焊缝的冶金反应, 提高焊接接头的力学性能; Yang 等人^[13]研究了预先在钢表面电镀制备的 Cu 涂层对后续的激光熔钎焊铝/钢接头界面组织和性能的影响, 结果表明, 合适的 Cu 涂层厚度可抑制界面处脆性的 Fe-Al 金属间化合物的生成, 提高接头性能.

冷喷涂作为一种高效的涂层制备表面改性技术, 可用于不同材料间过渡层的制备^[14]. 聂海杰等人^[15]基于冷喷涂技术预先在 AZ31B 镁合金表面制备 50 μm 的 Cu 涂层, 再通过接触反应钎焊的方式实现与优质沸腾钢的连接, 结果表明, 当连接温度为 530 $^{\circ}\text{C}$, 保温时间为 60 min 时, 获得钎焊接头最大抗剪强度为 36.9 MPa; 郭芮岐等人^[16]提出预先在铝合金母材表面通过冷喷涂技术制备 Ni 涂层作为中间层, 再通过常规电阻焊实现与双相钢的连接, 结果表明, Ni 中间层可有效阻止焊接过程中部分 Al 和 Fe 的相互扩散, 抑制脆性的 Fe-Al 金属间化合物生成, 提高接头载荷.

目前常规电阻点焊主要依靠焊接电流通过焊接电极在界面处形成熔核的方式实现铝/钢异种金属的连接, 主要以“点一点”的方式, 因此, 如果通过高电阻率石墨产生的焦耳热的方式实现一定截面下的铝/钢异种金属连接极具重要意义. 基于上述内容, 提出一种新型复合焊接方式—冷喷涂制备 Cu 涂层辅助电阻热扩散连接技术, 即预先通过冷喷涂技术在不锈钢基体表面制备 Cu 涂层作为中间层, 然后再通过电阻热扩散连接的方式形成的焦耳热, 获得一定截面下的铝/钢焊接接头, 为铝/钢异种金属连接提供新思路.

1 试验方法

试验选用 6061 铝合金和 304 不锈钢作为焊接母材, 并通过激光切割的方式从基板上获得铝合金和不锈钢, 试样尺寸均为 70 mm $\times$ 18 mm $\times$ 2 mm. 整个焊接过程分为 4 个步骤, 如图 1 所示, 第 1 步, 在正式试验前, 预先通过打磨机去除不锈钢表面的

氧化物、油污等杂质, 铝合金采用化学清理方式, 然后将其分别放置于丙酮溶液超声清洗 5 min, 待吹风机吹干后, 采用 1000 目砂纸将待焊部位深度打磨后, 再依次置于丙酮、酒精溶液超声清洗 5 min 后, 准备试验; 第 2 步, 在室温下, 基于冷喷涂设备用 80 目的 Al_2O_3 预先在不锈钢表面进行喷砂处理, 使工件表面形成凹凸不平的结构, 增加后续与 Cu 粉的结合力; 第 3 步, 再次通过此设备在喷砂后的不锈钢基体表面上喷涂一定厚度的 Cu 涂层作为中间层. 所用 Cu 粉微观形貌, 如图 2 所示, 其中图 2(a) 为整体形貌, 图 2(b) 为图 2(a) 中 A 区域放大, 由图可知, 整个喷涂粉末中包含两部分: 纯金属 Cu 粉和助焊剂 Al_2O_3 ; 最后通过机械加工的方式将不锈钢基体表面的 Cu 涂层铣削至 100、200、300、400 和 500 μm , 待清洗后与铝合金通过电阻热扩散连接方式实现一定截面下的有效连接.

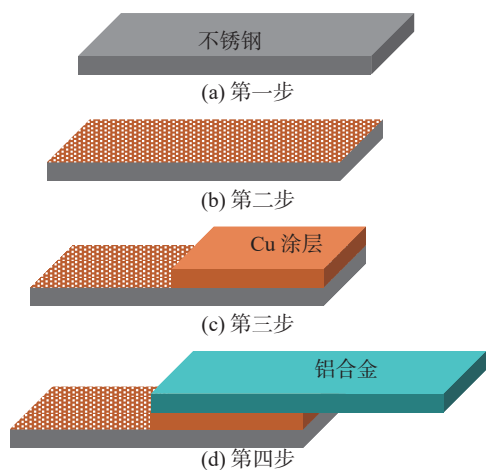


图 1 焊接顺序

Fig. 1 Welding procedure. (a) first step; (b) second step; (c) third step; (d) fourth step

铝/钢异种金属电阻热扩散连接过程示意图, 如图 3 所示, 选取高导电性的 CrZrCu 作为焊接电极, 电极端面尺寸为 $18\text{ mm} \times 18\text{ mm}$ 的正方形, 焊接过程中铝/钢异种金属为搭接方式, 搭接面面积为 $18 \times 18\text{ mm}^2$. 前期试验已表明, 焊接过程中仅依靠单独母材自身电阻产生的热量无法实现二者的有效连接, 因此, 选择高电阻率石墨作为辅助电极, 分别放置于焊接电极和铝合金/不锈钢之间, 整个焊接过程从上到下依次是焊接电极、上石墨、铝合金、Cu 涂层、不锈钢、下石墨、焊接电极. 根据焦耳定律, 在相同的焊接参数下, 辅助电极的加入会导致整个接头在焊接过程中形成更多的焦耳热. 焊接过程中所用焊接电源为高频逆变米基电阻焊电源

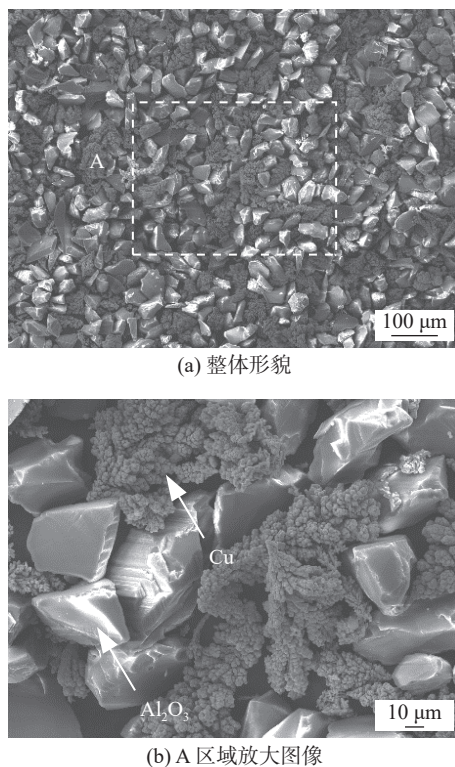


图 2 冷喷涂 Cu 粉微观形貌

Fig. 2 Microstructure of Cu powder in cold spray process. (a) whole morphology; (b) enlarged image of A area

(型号 HF2S), 焊接过程模式调节为“缝焊”模式, 即电阻缝焊. 基于前期试验结果, 焊接参数见表 1, 整个焊接时间包含两部分: 预压阶段和焊接阶段, 预压阶段时间约为 4 s. 因此, 在实际的焊接过程中, 焊接电源输出恒定的焊接电流通过辅助电极和待焊材料产生的焦耳热实现铝/钢界面处的有效连接, 因此, 整个焊接过程中形成的温度场可分为两部分: 一部分是辅助电极石墨电阻产生的热量形成的温度场, 另一部分为母材自身电阻产生的热量形成的温度场.

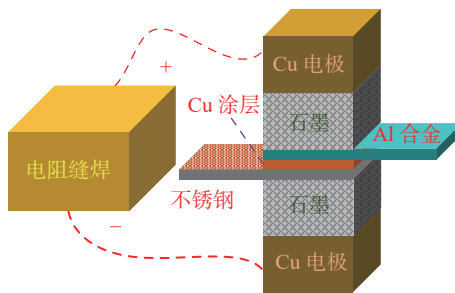


图 3 铝/钢异种金属电阻热扩散连接示意图

Fig. 3 Schematic diagram of Al/ steel joint by resistance thermal diffusion welding

通过光学显微镜 (optical microscope, OM)、扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM)

对获得的接头界面结构微观形貌进行观察,并通过能谱仪 (energy dispersive spectrometer, EDS) 确定界面处生成的物相,利用 WP4504 万能试验机测试获得的铝/钢搭接接头的拉剪载荷,拉剪速率为 0.5 mm/min,取 3 组相同焊接参数的试样的拉剪结果平均值作为最终载荷,并通过 OM 和 SEM 对接头断口形貌进行分析。

表 1 实际的焊接工艺参数
Table 1 Actual welding process parameters

焊接电流 I /kA	焊接压强 P /MPa	焊接时间 t /s
1.5	0.2	90

2 结果与讨论

2.1 预处理接头形貌

图 4 为基于冷喷涂技术在不锈钢表面喷涂 Cu 粉后接头整体横截面形貌,图 4(b) 为图 4(a) 中 A 区域放大图像,由图可知,涂层与不锈钢基体形成较好的结合,连接界面呈现波浪状的嵌合结构,可起到机械互锁作用,形成此现象是因为在正式喷粉前需在不锈钢表面进行喷砂处理,在此过程中 Al_2O_3 高速撞击不锈钢表面,随后,冷喷涂过程中 Cu 粉又以相同的方式高速撞击,最终沉积在不锈钢基体表面,形成此波浪状的嵌合结构,此外,整个 Cu 涂层中除 Cu 元素外还有一定量的黑色块状物质 Al_2O_3 。

2.2 Cu 涂层厚度对接头形貌的影响

不同 Cu 涂层厚度下铝/钢搭接接头宏观形貌,如图 5 所示,通过此种电阻热扩散连接的方式可获

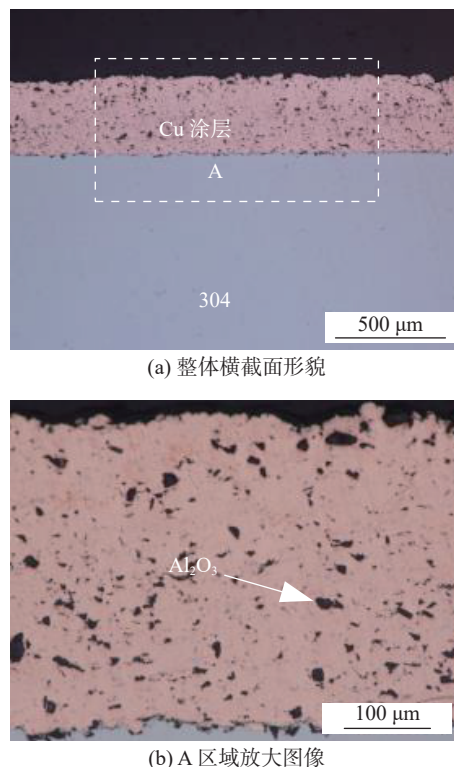


图 4 喷涂后钢表面横截面形貌

Fig. 4 Cross-sectional morphology of the joint after cold spray. (a) whole morphology; (b) enlarged image of A area

得完整的一定截面下铝/钢搭接接头,同时,接头成形完好,无明显的焊接缺陷。

2.3 Cu 涂层厚度对接头界面组织和性能的影响

不同 Cu 涂层厚度下铝/钢焊接接头微观组织形貌,如图 6 所示,整个接头分为 3 部分:铝合金、Cu 涂层和不锈钢,不同 Cu 涂层厚度下接头连接界面处均出现黑色物质助焊剂 Al_2O_3 ,此外,图中形貌表明不锈钢和 Cu 涂层之间形成较好的冶金结合,但铝合金和 Cu 涂层之间并未形成理想的结合。

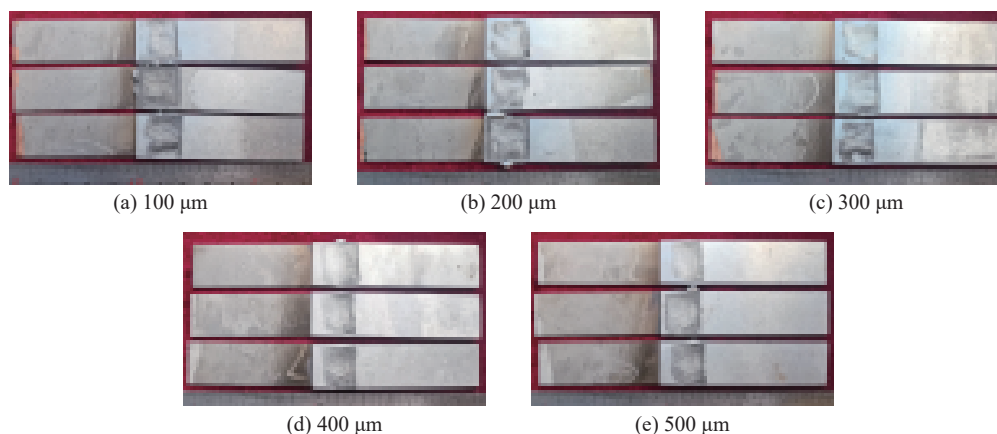


图 5 不同 Cu 涂层厚度下铝/钢焊接接头宏观形貌

Fig. 5 Macroscopic morphology of Al/steel welded joints with different Cu coating thickness. (a) 100 μm; (b) 200 μm; (c) 300 μm; (d) 400 μm; (e) 500 μm

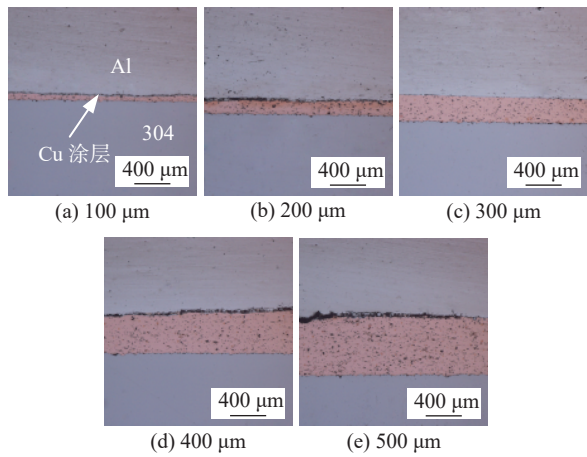


图 6 不同 Cu 涂层厚度下铝/钢焊接接头微观形貌

Fig. 6 Microstructure of Al/steel welded joint with different Cu coating thickness. (a) 100 μm ; (b) 200 μm ; (c) 300 μm ; (d) 400 μm ; (e) 500 μm

为进一步确定 Cu 涂层对铝/钢电阻热扩散连接接头的影响机制,分别获得不同 Cu 涂层厚度下铝/钢焊接接头界面 SEM,如图 7 所示,相关的 EDS 点扫描结果见表 2. 图 7(a) 为 Cu 涂层厚度为 100 μm 时接头界面形貌,同时,图 7(a) 中 A 和 B 的放大区域表明铝合金和 Cu 涂层之间形成明显的反应层,无焊接缺陷生成. 表 2 中相关位置的 EDS 结果显示该反应层中主要成分为 Al(s.s) 和少量的 Al_2Cu 金属间化合物. 同时,当涂层厚度为

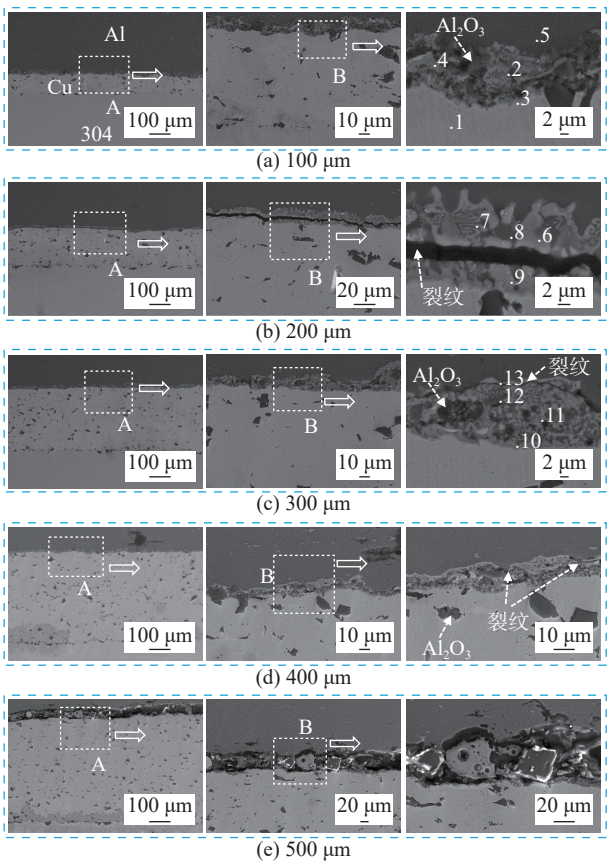


图 7 Cu 涂层厚度对接头微观组织形貌的影响

Fig. 7 Effect of Cu coating thickness on the microstructure of joint. (a) 100 μm ; (b) 200 μm ; (c) 300 μm ; (d) 400 μm ; (e) 500 μm

表 2 图 7 中相关位置 EDS 点扫描结果 (原子分数, %)
Table 2 EDS results at relevant positions in Fig. 7

位置	Al	Cr	Fe	Ni	Cu	可能相
1	0.42	0.35	0.39	0.32	98.52	Cu(s.s)
2	78.56	0.32	4.24	0.2	16.68	Al(s.s)
3	64.48	0.36	1.01	0.48	33.67	Al_2Cu
4	76.04	0.54	5.28	0.48	17.66	Al(s.s)
5	99.02	0.16	0.25	0.19	0.38	Al(s.s)
6	79.23	0.24	0.26	0.15	20.11	Al(s.s)
7	82.57	0.17	0.24	0.21	16.81	Al(s.s)
8	86.9	0.3	0.3	0.39	12.11	Al(s.s)
9	68.98	0.25	0.42	0.25	30.1	Al_2Cu
10	69.29	0.09	0.24	0.19	30.19	Al_2Cu
11	81.63	0.29	0.39	0.35	17.34	Al(s.s)
12	86.02	0.2	0.41	0.29	13.08	Al(s.s)
13	84.68	0.22	0.48	0.21	14.41	Al(s.s)

100 μm 时,反应层中 Fe 含量极少,表明此种方式制备的 Cu 涂层可有效抑制 Fe 和 Al 元素的相互扩散.对此,当 Cu 涂层厚度为 100 μm 时,获得的焊接接头结构从上到下依次为铝合金、Al(s.s)、Al(s.s) + Al_2Cu 、Cu(s.s)、Cu 涂层和不锈钢.

如图 7(b)~图 7(e) 所示,当 Cu 涂层厚度被增加至 200~500 μm 时,与图 7(a) 所示的界面横截面形貌一致,铝合金和 Cu 涂层之间形成了显著的反应层,但随着 Cu 涂层厚度增加,反应层中形成明显的裂纹等焊接缺陷.推测原因是 Cu 涂层厚度增加,导致整个焊接接头电阻增加,在相同的焊接参数下,整个接头生成更多的焦耳热,铝合金和 Cu 涂层间反应层生成较多的脆性 Al-Cu 金属间化合物,导致二者连接界面处出现裂纹等焊接缺陷,表 2 中 EDS 点扫描结果也再次证明反应层中 Al_2Cu 金属间化合物的生成.

不同 Cu 涂层厚度下铝/钢电阻热扩散连接接头的拉剪载荷分布,如图 8 所示,当 Cu 涂层厚度为 100 μm 时,获得的接头拉剪载荷达到 755.39 N,但随着 Cu 涂层厚度的增加,接头载荷却呈现逐渐降低的趋势,由图 7 中接头界面形貌可知,随着 Cu 涂层厚度增加,整个接头电阻增加,在相同的焊接参数下铝合金和 Cu 涂层之间因生成脆性的 Al-Cu 金属间化合物和焊接裂纹,降低了获得的焊接接头的拉剪载荷.

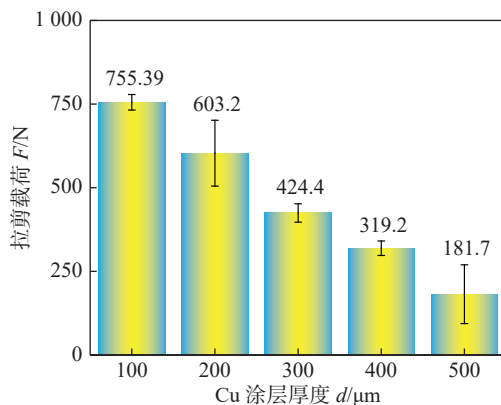


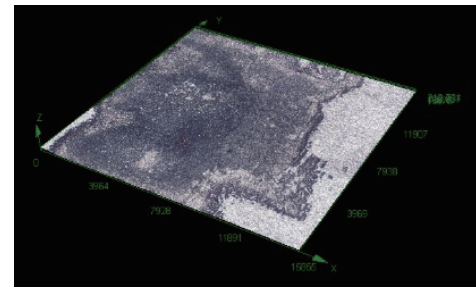
图 8 不同 Cu 涂层厚度下铝/钢焊接接头拉剪载荷

Fig. 8 Tensile-shear load of Al/steel welded joints with different Cu coating thickness

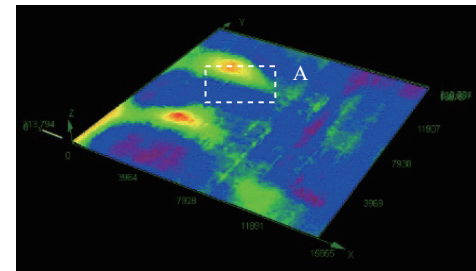
2.4 铝/钢电阻热扩散连接接头断口形貌分析

图 8 表明 Cu 涂层厚度为 100 μm 时获得的接头载荷最高,即钢表面最佳的 Cu 涂层厚度为 100 μm . Cu 涂层下接头断口形貌,如图 9 所示,图 9(a) 和图 9(c) 分别为 Cu 涂层为 100 μm 时获得的电阻热扩散连接接头铝侧和钢侧断口形貌,相关断口

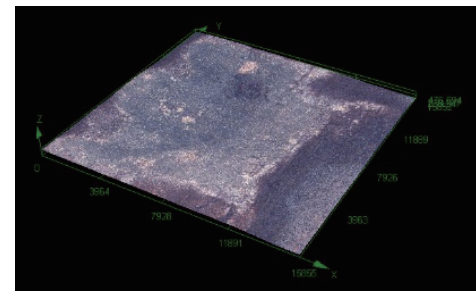
3d 形貌见图 9(b) 和 9(d),由 3d 断口形貌可知断裂形式为界面断裂,断口处形成明显的撕裂区域.



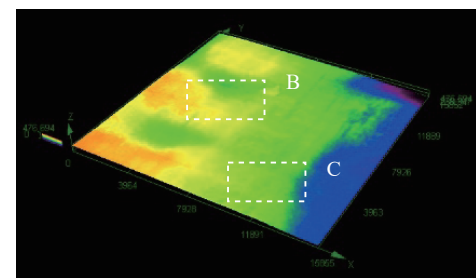
(a) 铝侧 OM 形貌



(b) 铝侧 3d 形貌



(c) 钢侧 OM 形貌



(d) 钢侧 3d 形貌

图 9 100 μm Cu 涂层下接头断口形貌

Fig. 9 Fracture morphology of joint with 100 μm Cu coating. (a) OM morphology with Al side; (b) 3d morphology with Al side; (c) OM morphology with steel side; (d) 3d morphology with steel side

为进一步弄清接头断裂机制,如图 10 所示,图 9 中 A、B、C 区域放大的 SEM 分别见图 10(a)~图 10(c),基于断裂形貌可知,进一步表面接头断裂形式为界面脆性断裂,图 10(a)~图 10(c) 中 D、E、F 放大图像分别见图 10(d)~图 10(f),铝侧和钢侧断口处呈现出台阶状断裂,其相关的 EDS 点扫描结果见表 3,断裂形貌成分主要为 Al(s.s) 和 Cu(s.s),表明接头断裂位于铝合金和 Cu 涂层的连接处.

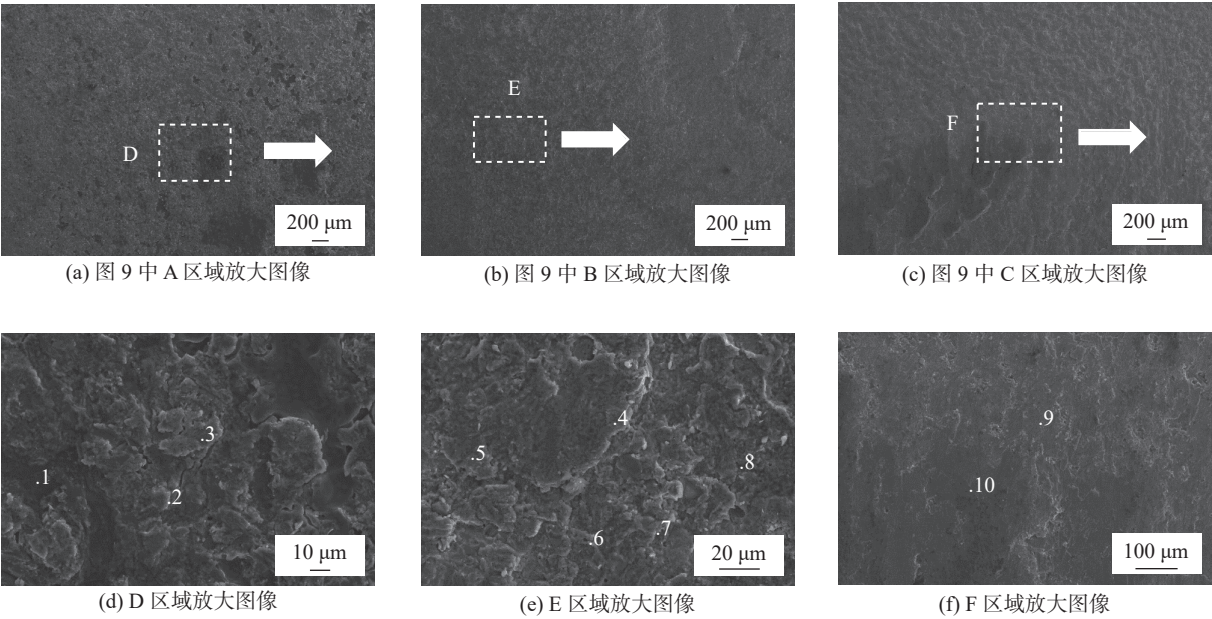


图 10 接头断口 SEM 形貌

Fig. 10 SEM morphology of the fracture surface of the joint. (a) enlarged image of A area in Fig.9; (b) enlarged image of B area in Fig.9; (c) enlarged image of C area in Fig.9; (d) enlarged image of D area; (e) enlarged image of E area; (f) enlarged image of F area

表 3 图 10 中相关位置的 EDS 结果 (原子分数, %)
Table 3 EDS results at relevant positions in Fig. 10

位置	Al	Cr	Fe	Ni	Cu	可能相
1	98.44	0.3	0.6	0.26	0.4	Al(s. s)
2	76.02	0.44	6.04	0.69	16.81	Al(s. s)
3	78.52	0.27	5	0.39	15.81	Al(s. s)
4	77.9	0.23	0.62	0.33	20.92	Al(s. s)
5	74.69	0.43	3.05	0.6	21.23	Al(s. s)
6	77.94	0.28	3.41	0.32	18.05	Al(s. s)
7	76.73	3.25	9.19	0.69	10.14	Al(s. s)
8	77.99	0.27	0.36	0.35	21.02	Al(s. s)
9	0.07	0.44	0.49	0.44	98.55	Cu(s. s)
10	21.95	0.43	6.94	0.63	70.05	Cu(s. s)

3 结论

(1) 采用冷喷涂在不锈钢基体表面制备 Cu 涂层作为中间层的方式, 将后续的电阻热扩散连接中原有的铝/钢连接转变为铝/铜连接, 实现铝合金和不锈钢异种金属的良好连接。

(2) 当 Cu 涂层厚度为 100 μm 时, 获得的铝/钢电阻热扩散连接接头拉剪载荷最大, 达到 755.39 N, 接头界面成形良好, 铝合金和 Cu 涂层之间形成明显的无缺陷的反应层, 反应层中主要成分为 Al(s. s) 和少量的 Al₂Cu 金属间化合物. 此涂层厚度下获得接头断裂形式为界面脆性断裂, 断裂位置主要位于铝合金和 Cu 涂层间的反应层。

(3) 当 Cu 涂层厚度大于 100 μm 时,接头载荷随着 Cu 涂层厚度的增加呈现降低的趋势,这主要是因为 Cu 涂层厚度增加,整个接头电阻呈现逐渐增加的趋势,在相同的焊接参数下,提高整个接头的温度场,导致连接界面处生成较多的脆性 Al-Cu 金属间化合物,铝合金和 Cu 涂层之间形成明显的裂纹等焊接缺陷,接头性能降低。

参考文献

- [1] 苗玉刚,赵羽扬,刘吉,等. 铝-钢堆焊-搅拌摩擦复合焊接头特性分析[J]. 焊接学报, 2021, 42(12): 72 – 77.
Miao Yugang, Zhao Yuyang, Liu Ji, *et al.* Aluminum-steel overlay-stir friction composite welded joint characteristics analysis[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2021, 42(12): 72 – 77.
- [2] 李军兆,刘一搏,孙清洁,等. 激光摆动模式对铝/钢焊接接头成形特征及组织、强度的影响[J]. 中国激光, 2020, 47(4): 141 – 148.
Li Junzhao, Liu Yibo, Sun Qingjie, *et al.* Effects of laser beam wobble on weld formation characteristics, microstructure, and strength of aluminum alloy/steel joints[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(4): 141 – 148.
- [3] 于晓全,樊丁,黄健康,等. 焊丝成分对铝/钢电弧辅助激光熔钎焊接头组织及力学性能的影响[J]. 材料导报, 2022, 36(18): 1 – 5.
Yu Xiaoquan, Fan Ding, Huang Jiankang, *et al.* Effect of filler wire composition on microstructure and mechanical property of the aluminum/steel arc assisted laser welding-brazing joint[J]. Materials Reports, 2022, 36(18): 1 – 5.
- [4] 温昌金,李玉龙,赵诚,等. 铝合金/镀锌钢异种材料薄板的超声波点焊[J]. 焊接学报, 2015, 36(9): 39 – 42.
Wen Changjin, Li Yulong, Zhao Cheng, *et al.* Ultrasonic spot welding of aluminum alloy and galvanized steel dissimilar metals sheets[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(9): 39 – 42.
- [5] 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 Jianxun, Jiang Xu, Xu Zhenzhen, *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.
- [6] Niu S Z, Lou M, Ma Y W, *et al.* Study on the microstructure and mechanical performance for integrated resistance element welded aluminum alloy/press hardened steel joints[J]. Materials Science & Engineering A, 2021, 800: 140329.
- [7] Chen N N, Wang H P, Carlson Blair E, *et al.* Fracture mechanisms of Al/steel resistance spot welds in coach peel and cross tension testing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 252: 348 – 361.
- [8] 马潇天,黄永宪,闫德俊,等. 铝/钢搅拌摩擦焊金属间化合物调控研究进展[J]. 焊接学报, 2020, 41(7): 1 – 11.
Ma Xiaotian, Huang Yongxian, Yan Dejun, *et al.* Progress on the control of intermetallic compounds in aluminum/steel friction stir welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2020, 41(7): 1 – 11.
- [9] 相倩,吕念春,薛鹏,等. 铝-钢异种金属搅拌摩擦焊研究现状及展望[J]. 机械工程学报, 2017, 53(20): 28 – 37.
Xiang Qian, Lü Nianchun, Xue Peng, *et al.* Research status and prospect on friction stir welded dissimilar Al-Steel joints[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(20): 28 – 37.
- [10] Yu J, Fan Y L, Du R M, *et al.* Interfacial microstructure and mechanical properties of Al/steel joints fabricated via thermo-compensated resistance brazing welding with cold spray Zn interlayer[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 24: 5094 – 5107.
- [11] Long J Q, Huang W H, Xiang J W, *et al.* Parameter optimization of laser welding of steel to Al with pre-placed metal powders using the Taguchi-response surface method[J]. Optics and Laser Technology, 2018, 108: 97 – 106.
- [12] Chen S H, Zhai Z L, Huang J H, *et al.* Interface microstructure and fracture behavior of single/dual-beam laser welded steel-Al dissimilar joint produced with copper interlayer[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 82(1-4): 631 – 643.
- [13] Yang T, Dai W, Chen L, *et al.* Thermodynamically revealing the effect mechanism of Cu on the interfacial metallurgical reaction for Al/steel welding-brazing joint[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2022, 299: 117372.
- [14] Chen C Y, Xie Y C, Yin S, *et al.* Ductile and high strength Cu fabricated by solid-state cold spray additive manufacturing[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2023, 134: 234 –

243.

- [15] 聂海杰, 李红, 龙伟民, 等. 采用冷喷涂铜涂层做中间层的镁合金与钢共晶接触反应钎焊工艺及接头性能 [J]. 焊接学报, 2016, 37(7): 83 – 87.

Nie Haijie, Li Hong, Long Weimin, *et al.* Eutectic contact reactive brazing process and joint properties of magnesium alloy and steel using cold sprayed copper coating as interlayer[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(7): 83 – 87.

- [16] 郭芮岐, 张勇, 翁福娟, 等. 冷喷镍中间层铝/钢电阻点焊接头组

织及力学性能 [J]. 焊管, 2019, 42(5): 18 – 23.

Guo Ruiqi, Zhang Yong, Weng Fujuan, *et al.* Microstructure and mechanical properties of cold spraying Ni interlayer Al/Steel resistance spot welding joints[J]. Welded Pipe and Tube, 2019, 42(5): 18 – 23.

第一作者: 于江, 博士, 助理研究员; 主要从事铝/钢异种金属电阻焊工艺及机理研究; Email: yujiang@hit.edu.cn.

通信作者: 张洪涛, 博士, 教授; Email: zhanght@hitwh.edu.cn.

(编辑: 刘启明)

(上接第 13 页)

- [15] Choi J H, Lee J Y, Yoo C D. Simulation of dynamic behavior in a GMAW system[J]. Welding Journal, 2001, 80(10): 239s – 245s.

- [16] Chen G Q, Liu J P, Shu X, *et al.* Numerical simulation of keyhole morphology and molten pool flow behavior in aluminum alloy electron-beam welding[J]. [International Journal of Heat and Mass Transfer](#), 2019, 138: 879 – 888.

- [17] Planckaert J P, Djermoune E H, Brie D, *et al.* Modeling of MIG/MAG welding with experimental validation using an active contour algorithm applied on high speed movies[J]. [Applied](#)

[Mathematical Modelling](#), 2010, 34(4): 1004 – 1020.

- [18] 张栋. 波形参数对高速 CMT 焊接稳定性及焊缝成形影响的研究 [D]. 济南: 山东大学, 2016.

Zhang Dong. Research on the effect of waveform parameters on welding stability and welding formation in high speed CMT welding[D]. Jinan: Shandong University, 2016.

第一作者: 吕小青, 博士, 副教授; 主要从事弧焊工艺、焊接逆变电源及自动化、弧焊混沌理论等方面的研究; Email: xiaoqinglv@tju.edu.cn.

(编辑: 刘启明)