

Ag 对热电耦合作用下铝/钢摩擦焊接头界面组织演变的影响

张昌青^{a,b}, 史煜^{a,b}, 王烨^{a,b}, 谷怀壮^{a,b}, 马东东^{a,b}, 芮执元^c

(兰州理工大学 a.省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室;

b.材料科学与工程学院; c.机电工程学院, 兰州 730050)

摘要: **目的** 解决铝/钢摩擦焊接头在热电耦合后失效的问题, 探究过渡元素对热电耦合后接头力学性能与界面组织的影响机理。 **方法** 采用刷镀法在 Q235 钢棒端面添加过渡元素 Ag 并与 1060 纯铝棒进行连续驱动摩擦焊接, 与未添加 Ag 的接头一起开展为期 56 d、静载 40 kg、高温 300 °C、直流 60 A 的热电耦合实验, 对比分析热电耦合影响下未添加 Ag 与添加 Ag 两种接头力学性能与界面微观组织的变化。 **结果** 经过热电耦合处理后的接头界面发生脆断, 其抗拉强度为原始接头的 96.2%, 伸长量为原始接头的 28.9%, 界面金属间化合物出现裂纹、孔洞等缺陷。添加过渡元素 Ag 后, 接头抗拉强度为原始接头的 98.2%, 断裂部位为铝母材并出现颈缩, 界面金属间化合物层未出现裂纹、孔洞等缺陷。 **结论** 在为期 56 d、静载 40 kg、高温 300 °C、直流 60 A 的热电耦合作用下, 添加过渡元素 Ag 的铝/钢接头可以维持原始接头的力学性能和界面组织。

关键词: 铝/钢异质接头; 连续驱动摩擦焊; 过渡元素; 金属间化合物; 热电耦合

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2022.11.016

中图分类号: TG456 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2022)11-0163-07

Effect of Ag on Microstructure Evolution of Aluminum/Steel Friction Welding Joints Under Thermoelectric Coupling

ZHANG Chang-qing^{a,b}, SHI Yu^{a,b}, WANG Ye^{a,b}, GU Huai-zhuang^{a,b}, MA Dong-dong^{a,b}, RUI Zhi-yuan

(a. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals; b. School of Materials Science and Engineering; c. School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

ABSTRACT: The work aims to solve the joint failure problem of Al/Steel friction welded joint after thermoelectric coupling, and explore the influence mechanism of transition elements on mechanical properties and interface structure of the joint after thermoelectric coupling. The transition element Ag was added to the weld faying surface of Q235 steel rods by brush plating, and was continuously driven friction welding with 1060 pure aluminum rods. The joint carried out thermoelectric coupling test for 56 days under load of 40 kg, high temperature of 300 °C and DC 60 A with the joint without Ag. The mechanical properties and interface microstructure of the two kinds of joints under the influence of thermoelectric coupling were compared and analyzed. The results show that after the thermoelectric coupling treatment, brittle fracture occurs at the interface of the original joint. The tensile strength and the elongation are 96.2% and 28.9% of that of the original joint, respectively. There are cracks and holes in the intermetallic compound at the interface. After the addition of transition element Ag, the tensile strength of the joint is 98.2% of that of the original joint, and the fracture site is aluminum base material. The fracture site is aluminum base material

收稿日期: 2022-06-01

基金项目: 国家自然科学基金(51961025)

作者简介: 张昌青 (1973—), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为异种金属固相工艺及设备。

通讯作者: 芮执元 (1962—), 男, 硕士, 教授, 主要研究方向为数字制造及成套自动化装备、计算机仿真与虚拟技术及机械强度理论。

with neck shrinkage, and there are no cracks, holes and other defects in intermetallic compound layer. Under the thermoelectric coupling effect of 40 kg static load, 300 °C and DC 60 A for 56 days, the aluminum/steel joints with transition element Ag can maintain the mechanical properties and interface structure of the original joint.

KEY WORDS: aluminum/steel dissimilar joint; continuous drive friction welding; transition element; intermetallic compound; thermoelectric coupling

通过连续驱动摩擦焊 (Continuous Drive Friction Welding, CDFW) 连接的铝钢复合构件既同时具有铝与钢的优点, 又规避了熔焊过程中易产生的缺陷, 可满足众多特殊的使用要求^[1-2], 受到了科研工作者的关注。

新型铝电解槽阳极导电装置^[3]的连接处采用 CDFW 进行焊接, 其接头环境温度在 300 °C 以上, 承载 8 000 A 电流, 周期长达 28 d。铝钢复合接头界面易出现金属间化合物 (Intermetallic Compound, IMC)^[4], 而在热电耦合作用下, IMCs 厚度会进一步增加, 甚至出现由热失配和传质分离引起的空洞和裂纹等缺陷^[5], 导致接头连接失效而影响生产。当通过复合接头的电流密度较高时, 原子会随之发生定向移动, 进而使接头出现空洞^[6-7], 即电迁移效应; 同时, 电流流经接头产生的焦耳热^[8]与外加的载荷将导致热迁移效应^[9]。这两种效应的产生使接头出现界面金属间化合物的极性生长^[10-11], 并使接头出现裂纹、孔洞等缺陷。Sravanthi 等^[12]对铝钢接头进行了腐蚀实验, 发现焊缝中的 IMCs 加剧了接头界面电偶腐蚀; Li 等^[13]利用放电等离子烧结技术 (SPS) 研究了 Fe-Al 扩散的电迁移效应, 发现随着温度的升高, 主要成分为硬脆 Fe_2Al_5 相的 IMCs 层增长速度大幅加快; 王树文等^[14]对铝/钢接头进行了 60 d 的热电耦合实验, 发现接头力学性能变差, IMCs 腐蚀沟槽, 铝侧出现开裂现象, 界面处出现铝元素偏聚现象。抑制异种元素的相互扩散、减缓 IMCs 的增长, 是解决热

电耦合后接头失效问题的关键。

学者们发现, 添加过渡元素可以减小 IMCs 的厚度, 减少异种金属的相互扩散。Meshram 等^[15]发现, 银作为过渡元素可以减少 Fe-Al 脆性金属间化合物的形成, 并形成 Al-Ag IMCs, 如 Ag_2Al 与 Ag_3Al , 使焊缝具有更好的力学性能; Reddy 等^[16]发现, 在铝钢 CDFW 中, 采用电镀法添加的 Ni、Cu、Ag 3 种元素对接头性能有不同程度的提升, 其中 Ag 元素提升最大, Ag 中间层起到的主要作用是减少 IMCs 的生成及抑制异种金属之间的相互扩散; Lee 等^[17]使用 72Ag-28Cu 合金填料和 Ag 中间层焊接纯钛与不锈钢, 并研究了其腐蚀行为, 发现添加 Ag 中间层后, 接头阳极位置从富 Cu 区转移到含 Ag 相。文中通过刷镀法将 Ag 添加到钢棒上作为过渡元素, 对焊接后所得接头进行热电耦合实验, 观察其界面微观组织, 并与未添加过渡元素接头的微观组织对比, 研究过渡元素对界面的影响机理, 为铝钢复合接头性能优化提供依据。

1 实验材料与方法

实验采用尺寸为 $\Phi 25 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 的 1060 工业纯铝棒材, 抗拉强度为 81 MPa; 尺寸 $\Phi 40 \text{ mm} \times 125 \text{ mm}$ 的 Q235 低碳钢棒材, 抗拉强度为 390 MPa, 材料主要成分如表 1 所示。1060 纯铝棒不经过特殊处理, 对 Q235 钢棒进行镀银处理。

表 1 母材的主要化学成分
Tab.1 Main chemical composition of the base materials

Sample	wt. %								
	C	Mn	Si	P	S	Mg	Cu	Fe	Al
1060 铝		0.03	0.25			0.03	0.05	0.35	Bal.
Q235 钢	0.18	1.4	0.3	0.045	0.045			Bal.	

镀银之前使用砂纸将 Q235 钢棒端面表面打磨去锈, 然后使用电刷镀将过渡元素添加到 Q235 钢接触面, 电刷镀的工艺流程为: 使用砂纸对接头进行去锈处理—使用电净液进行去油处理—清水冲洗—使用活化液进一步去锈—清水冲洗—在钢棒表面刷镀 Ag, 通过刷镀时间控制镀层厚度, 将厚度控制为 10 μm 。

实验采用的焊机为 C320-5 型连续驱动摩擦焊机。焊前对母材表面进行除锈、去油污处理, 焊接参

数为: 转速 1 500 r/min, 摩擦压力 30 MPa, 摩擦时间 1 s, 顶锻压力 80 MPa, 顶锻时间 1 s, 焊接时固定钢侧、旋转铝侧。

以实际 200 kA 铝电解工况为例, 阳极导杆组需在 1.5 t 碳块承载、温度 300 °C、电流 8 000 A 条件下进行以 28 d 为 1 个周期的工作。实验模拟实际工况条件, 进行静载 40 kg、高温时效 (300 °C)、电流腐蚀 (直流 60 A) 的热电耦合实验, 实验时间为 56 d。

热电耦合实验过程如图 1 所示。将管式炉设置为恒温 300 ℃; 接头钢侧悬挂于悬挂端, 铝侧连接 40 kg 砝码作为恒定载荷, 通过晶闸管控制 25 kW 变压器实现

能量输出, 再利用整流桥将输出的交流电转变成恒定的 60 A 直流电, 钢侧接正极, 铝侧接负极。自制热蠕变实验机进行实验。

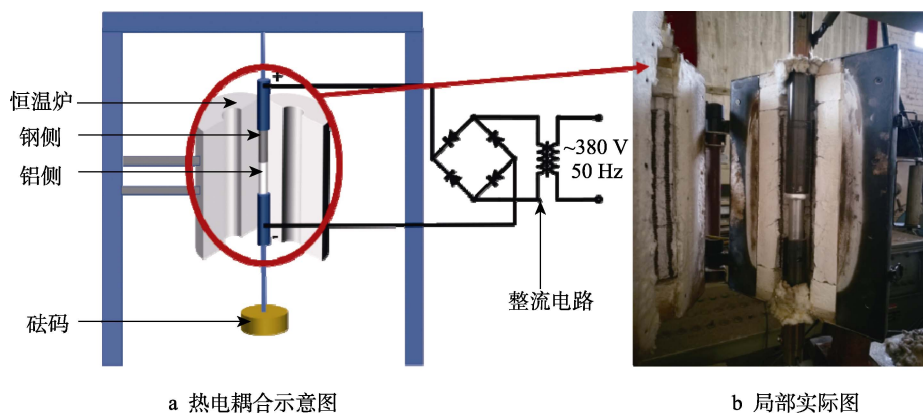


图 1 热电耦合实验示意图
Fig.1 Schematic diagram of thermoelectric coupling test

采用整体拉伸机进行整体室温拉伸, 采用线切割制备金相样品, 利用场发射扫描电子显微镜 (SEM) 观察接头 IMCs, X 射线能谱仪 (EDS) 测量界面元素分布。

2 结果与分析

2.1 焊接接头宏观形貌

摩擦焊接头与热电耦合实验后接头的宏观形貌如图 2 所示。未添加过渡元素的接头飞边呈圆弧状, 弧度较小且连续均匀; 添加过渡元素 Ag 的接头由于端面 Ag 的存在, 使得连接面的摩擦因数降低, 进而导致产热降低, 塑性金属流动受阻, 接头飞边较短且弧度较大。



图 2 接头宏观形貌
Fig.2 Macro morphology of the joints

2.2 拉伸性能

将经过热电耦合处理的接头进行整体拉伸实验, 拉伸断口宏观图如图 3 所示, 抗拉强度曲线如图 4 所

示。接头抗拉强度计算方式: 抗拉强度=载荷/铝母材横截面积。结果表明, 原始接头断裂位置在铝侧母材, 抗拉强度为 85.6 MPa, 伸长量为 42.6 mm, 断口处发生颈缩。经过 56 d 热电耦合处理后, 在界面处发生脆断, 抗拉强度为 82.4 MPa, 伸长量仅为 12.3 mm。添加过渡元素 Ag 后, 断裂位置为铝侧母材, 抗拉强度为 84.1 MPa, 伸长量为 51.7 mm, 断口出现颈缩现象。由此可见, 经过热电耦合处理后, 接头力学性能下降, 强度低于铝母材。添加过渡元素 Ag 后, 经热电耦合作用的接头维持了原始接头的力学性能。

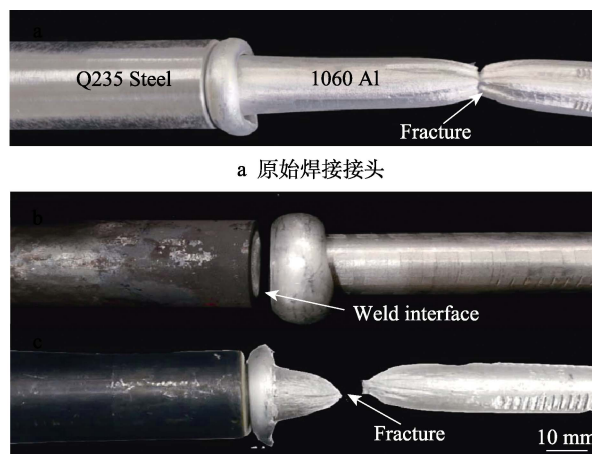


图 3 拉伸断口宏观形貌
Fig.3 Macro morphology of the tensile fracture

2.3 微观组织分析

原始接头、热电耦合 28 d 后接头、热电耦合 56 d 后接头、添加过渡元素 Ag 且经热电耦合 56 d 的接头界面沿径向的形貌如图 5 所示。使用 CDFW 焊接轴类

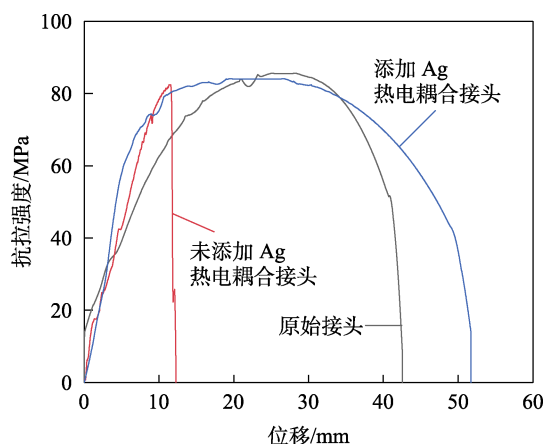
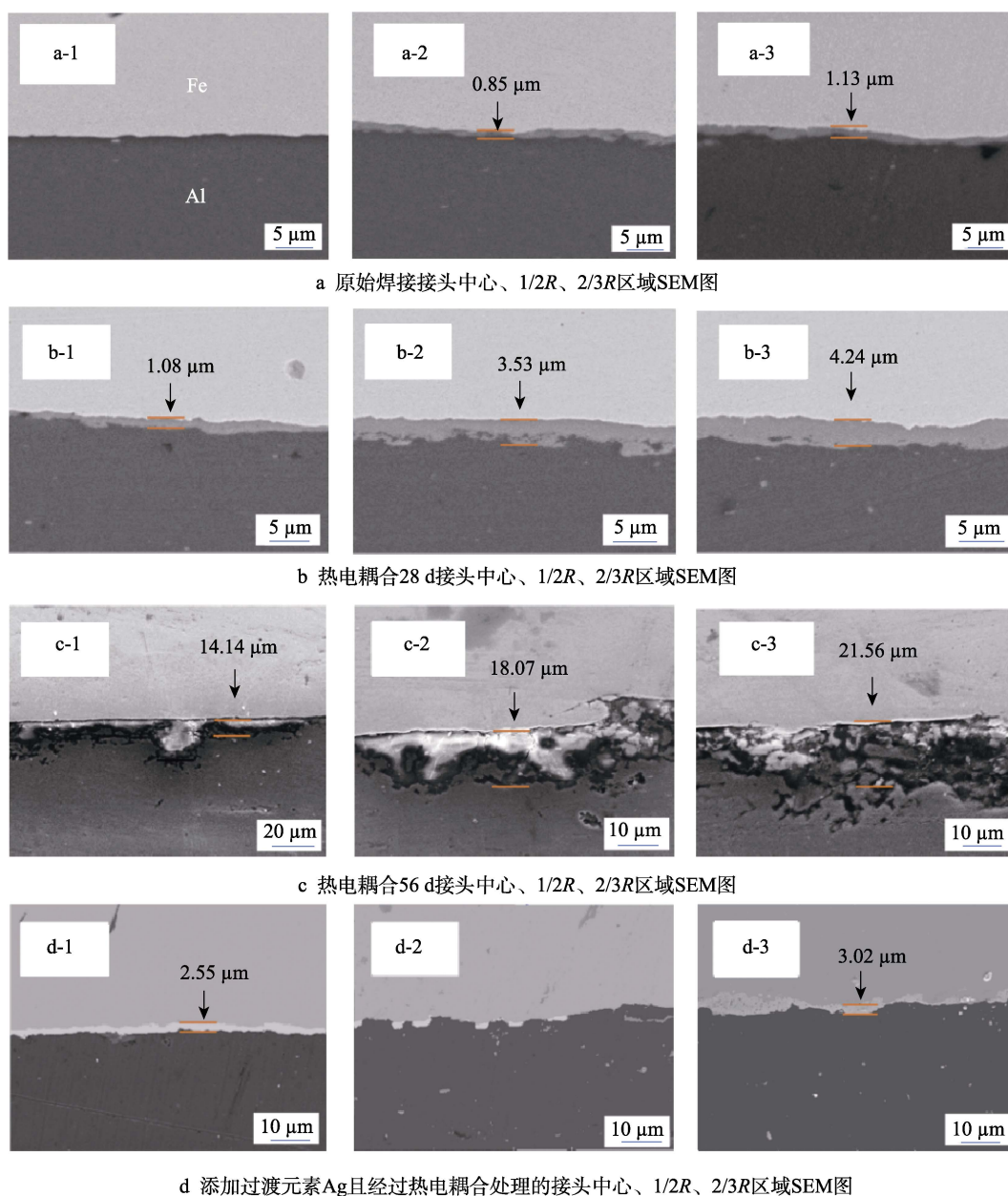


图4 接头拉伸性能
Fig.4 Tensile strength of joints

试样时，由于试样沿半径方向摩擦扭矩不均匀而导致产热不均匀，进而导致接头界面组织分布不均匀^[18]，其中接头中心区域、 $1/2R$ 区域、 $2/3R$ 区域差异明显，故SEM分析选择以上3个区域作为分析对象，图中上为钢侧，下为铝侧。

由图5a-1可以看出，原始接头中心处几乎没有明显的IMCs层；由图5a-2、a-3可知，接头 $1/2R$ 处到 $2/3R$ 处有明显且连续的IMCs层， $1/2R$ 处IMCs层厚度为 $0.85\mu\text{m}$ ， $2/3R$ 处IMCs层厚度达到 $1.13\mu\text{m}$ ，这是由连续驱动摩擦焊的固有特点决定的，因为在摩擦过程中，接头各部分的角速度与扭矩在径向分布上有差异，使得摩擦产热在径向上不均衡。中心处产热最低，冶金反应不充分，未形成明显的IMCs层，



d 添加过渡元素Ag且经过热电偶处理的接头中心、 $1/2R$ 、 $2/3R$ 区域SEM图

图5 不同接头不同位置的SEM图

Fig.5 SEM images of different joints at different positions

1/2R~2/3R 处角速度与扭矩较大, 产热高, 界面温度高, 形成了较厚的 IMCs 层, 且 2/3R 处 IMCs 层厚度大于 1/2R 处。

图 5b 为热电耦合 28 d 后接头的 SEM 图。对比图 5a 与图 5b 可见, 经热电耦合 28 d 后, 接头各处 IMCs 均出现长大的现象。由图 5b-1 可知, 接头中心处出现 IMCs, 厚度为 1.08 μm ; 由图 5b-2 与图 5b-3 可知, 1/2R 处 IMCs 层厚度从 0.85 μm 增长到 3.53 μm , 2/3R 处 IMCs 层厚度从 1.13 μm 增长到 4.24 μm 。

图 5c 为热电耦合 56 d 后接头的 SEM 图。对比图 5a 与图 5c 可观察到, 在热电耦合 56 d 后, 接头各部位都出现了严重的缺陷, 焊缝界面形成腐蚀沟槽, 钢侧未出现明显变化, 但与 IMCs 层分离开裂, 铝侧出现大量的裂纹和孔洞, 裂纹由 IMCs 扩展到铝侧。由图 5c-1 可知, 经热电耦合后, 接头中心处 IMCs 急剧生长, 且进一步出现了裂纹, 但相对于接头其他区域, 中心处的裂纹较窄、较浅; 观察图 5c-2 与图 5c-3 可得, 接头 1/2R 与 2/3R 处的 IMCs 层经过热电耦合后进一步长大, 裂纹也较宽、较深。可以发现, 裂纹的大小和生长速率与 IMCs 层的大小呈正相关, 实验接头裂纹开裂程度沿半径分布与原始接头 IMCs 层厚度分布基本一致, 说明 IMCs 层是铝/钢接头界面产生裂纹的必要条件, IMCs 层也加快了腐蚀和裂纹扩展的速度。

由于经过长时间热电耦合实验, 接头界面变化的原因受到多种因素的复合影响。铝、钢原子扩散效率不同, 钢侧原子扩散较慢, 铝侧原子扩散较快, 铝侧易出现空位, 随着界面处空位不断累积, 铝侧及 IMCs 层中形成了柯肯达尔空洞^[15]。同时, 在电场力与电荷载流子力共同影响下, 界面的金属原子会受到电子风力的作用, 导致界面的扩散现象加剧。接头界面受电子风力的影响主要体现在两个方面: 其一是界面受电子风力作用时, 原子定向移动, 加快了 IMCs 的生长速度, 进而促进了裂纹的产生和延展; 其二是金属原子由于电子风力发生定向迁移, 在铝侧的部分铝原子被消耗, 导致铝侧产生孔洞。

除此之外, 铝、钢的电化学性质差异较大, 当它们连接在一起时, 铝侧处于低电位, 钢侧处于高电位, 二者构成电偶腐蚀原电池, 铝侧发生极化, 从而导致界面的铝侧出现腐蚀现象。铝侧的 IMCs 层进一步加速了腐蚀速度, 最终与裂纹和孔洞形成沟槽。铝、钢热膨胀系数的差异导致的残余应力会加速裂纹尖端的腐蚀^[19]。

由图 5d-1 可知, 接头中心处的含 Ag 中间层厚度为 2.55 μm , 这是由于中间层与母材结合强度相对较低, 所以中间层在连续驱动摩擦焊接头中的分布不但受摩擦产热的影响, 还受离心力的影响。接头中心处角速度较低, 离心力较小, 刷镀的 Ag 中间层受到的离心力作用小, 在摩擦过程中无法被挤出, 最终大部分留在中心处形成 IMCs。由图 5d-2 可知, 1/2R 处的 IMCs 较少, 未出现连续的 IMCs 层, 少量 IMCs 呈点状间断分布于界面, 这是由于 1/2R 处离心力较大, 大部分 Ag 中间层沿径向被挤到外围, 少量 Ag 留下形成 IMCs。由图 5d-3 可知, 2/3R 处 IMCs 厚度为 3.02 μm , 因为 2/3R 处产热量最多, 促进了 IMCs 层的生长。对比图 5c、d 可知, 相较于未添加过渡元素的接头, 添加过渡元素 Ag 的接头界面形貌明显改善, 未出现开裂和裂纹空洞的缺陷, 界面结合较好, 形貌较为曲折, IMCs 层的厚度介于原始接头 IMCs 层与未添加过渡元素但经过热电耦合处理的接头 IMCs 层之间。这可能是由于过渡元素 Ag 的加入, 接头连接处摩擦因数降低 (Ag 的摩擦因数相对于 Fe 和 Al 较小), 进而使焊接时产热降低, IMCs 层变薄。而力学性能较差的铝/钢 IMCs 是裂纹产生及扩展的重要原因, IMCs 层厚度的减小抑制了微裂纹的产生。同时, 由于温度降低导致接头冶金结合与机械结合共存, 使得界面形貌变得崎岖不平, 并在一定程度上减少了冶金结合产生的缺陷。

接头 2/3R 处元素扫描结果如图 6b 所示, 界面较为清晰地分为 Al 侧-含 Ag 中间层-Fe 侧 3 层, 由于 Ag 中间层的存在, 界面的连接从 Fe-Al 二元的扩散

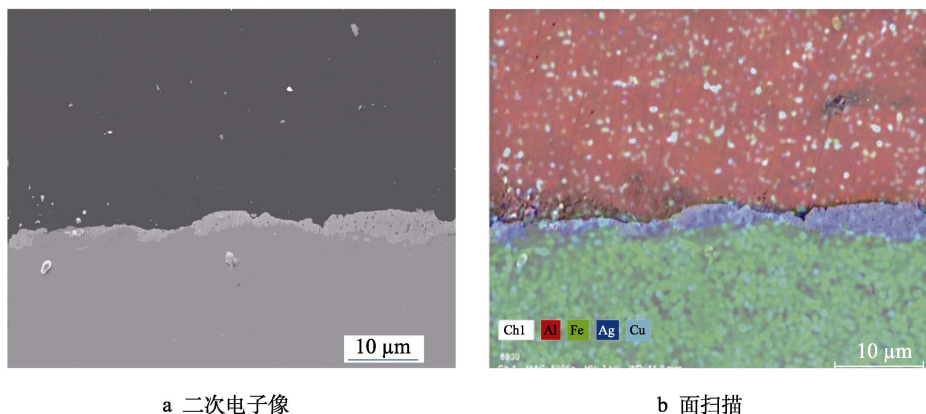


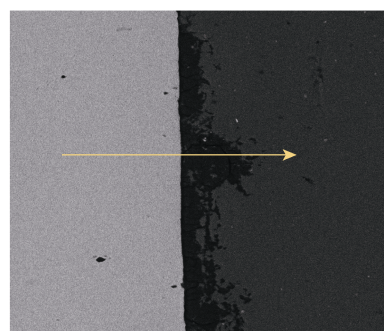
图 6 添加过渡元素 Ag 的接头 2/3R 处 IMCs 层形貌

Fig.6 Morphology of IMCs layer at 2/3R of joint with transition element Ag

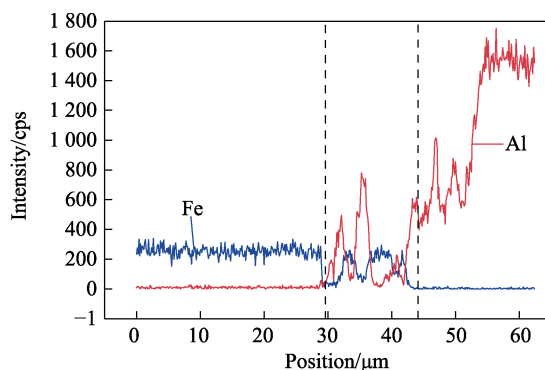
系统变为了 Fe-Ag-Al 三元扩散系统,从 Fe-Ag 二元相图可以看出,Fe 在 Ag 中的溶解度几乎为 0,含 Ag 中间层阻断了 Fe 与 Al 之间的相互扩散,使柯肯达尔效应的影响降低甚至消失^[20],同时,由电子风力引起的铝侧电迁移效应也由于过渡元素的阻断效果,导致铝原子几乎无法向铁侧扩散,从而减少了因为铝原子的迁移而生成的孔洞。

接头中心处线扫描结果如图 7 所示,由图 7a、b 可知,经热电耦合后的接头元素沿垂直于焊缝直线的

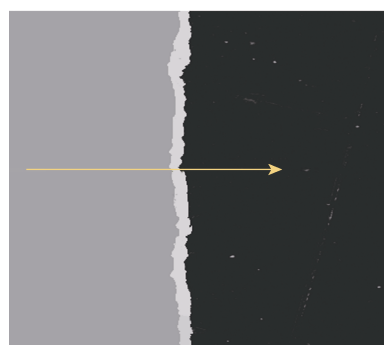
变化较为曲折,铝原子、铁原子在 IMCs 分布不均匀,扩散范围接近 25 μm ;由图 7c、d 可知,添加过渡元素 Ag 后,界面元素变化均匀,未出现成分偏析的现象,扩散范围仅仅约 3 μm 。根据图示结果推测,接头形成了力学性能较为良好的 Ag_2Al 、 Ag_3Al 等铝/银化合物^[15],使接头不易产生硬脆 IMCs 导致的缺陷,同时也提高了接头的韧性。由于含银 IMCs 的生成,接头的电位分布也会发生改变,含银 IMCs 可能成为接头的阳极^[17],从而抑制两侧的电偶腐蚀。



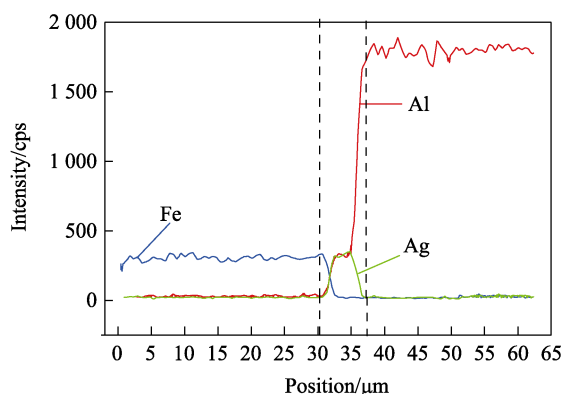
a 未添加过渡元素接头中心处形貌



b 未添加过渡元素接头中心处线扫描



c 添加过渡元素Ag接头中心处形貌



d 添加过渡元素Ag接头中心处线扫描

图 7 未添加过渡元素和添加过渡元素 Ag 的接头中心处形貌及其线扫描

Fig.7 Morphology and line scan at the central area of joints without transition elements and with transition element Ag

3 结论

1) 经过 28 热电耦合处理后,接头各部分 IMCs 变厚,经过 56 d 热电耦合处理后,接头力学性能显著下降,接头界面 IMCs 层与钢侧分离,出现腐蚀沟槽,IMCs 内部出现裂纹,并向铝侧扩展;钢侧没有明显变化,铝侧形成大量的裂纹与孔洞;焊缝处出现成分偏析;

2) 添加过渡元素 Ag 后,在热电耦合影响下铝/钢接头性能与界面组织得到维持,IMCs 层变薄,未出现明显的裂纹、孔洞,成分较为均匀,未出现成分偏析。这是因为过渡元素 Ag 可通过减少 IMCs 的生成,阻碍铝与钢的相互扩散,改变接头理化性质,进而改善接头性能来调控界面形貌,以改善接头性能。

参考文献:

- [1] GULLINO A, MATTEIS P, D'AIUTO F. Review of Aluminum-to-Steel Welding Technologies for Car-Body Applications[J]. Metals, 2019, 9(3): 315.
- [2] 张昌青, 王树文, 罗德春, 等. 工艺参数对铝/钢旋转摩擦焊接头组织的影响[J]. 有色金属工程, 2022, 12(2): 8-13.
ZHANG Chang-qing, WANG Shu-wen, LUO De-chun, et al. Influence of Process Parameters on Structure of Aluminum/Steel Rotary Friction Welding Joints[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022, 12(2): 8-13.
- [3] 王希靖, 李经纬, 张昌青, 等. 电解铝阳极导杆铝-钢相位摩擦焊工艺及力学性能[J]. 焊接学报, 2015, 36(9): 83-86.
WANG Xi-jing, LI Jing-wei, ZHANG Chang-qing, et al.

- Phase Friction Welding of Aluminum to Steel for Electrolytic Aluminum Anode Guide Rod[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2015, 36(9): 83-86.
- [4] 秦丰, 李睿, 张春波, 等. 铝/钢异种金属轴向摩擦焊接研究现状[J]. 材料导报, 2021, 35(21): 21228-21235.
QIN Feng, LI Rui, ZHANG Chun-bo, et al. Research Status on Axial Friction Welding of Aluminum/Steel Dissimilar Metals[J]. Materials Reports, 2021, 35(21): 21228-21235.
- [5] 师昌绪. 材料科学与工程手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
SHI Chang-xu. Handbook of Materials Science and Engineering[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [6] LAI Yi-shao, KAO C L. Characteristics of Current Crowding in Flip-Chip Solder Bumps[J]. Microelectronics Reliability, 2006, 46(5/6): 915-922.
- [7] WANG Hao-ren, KOU Rui, HARRINGTON T, et al. Electromigration Effect in Fe-Al Diffusion Couples with Field-Assisted Sintering[J]. Acta Materialia, 2020, 186: 631-643.
- [8] CHIU S H, LIANG S W, CHEN C, et al. Joule heating effect under accelerated electromigration in flip-chip solder joints[C]//56th Electronic Components and Technology Conference. San Diego, CA, USA. IEEE, 2006: 663-666.
- [9] 刘志斌, 乔媛媛, 赵宁. Zn含量对Cu/Sn/Cu-xZn微焊点界面反应的影响[J]. 机械工程学报, 2022, 58(2): 269-275.
LIU Zhi-bin, QIAO Yuan-yuan, ZHAO Ning. Effect of Zn Content on Interfacial Reactions of Cu/Sn/Cu-xZn Micro Solder Joints[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(2): 269-275.
- [10] 吴懿平, 张金松, 吴丰顺, 等. SnAgCu凸点互连的电迁移[J]. 半导体学报, 2006, 27(6): 1136-1140.
WU Yi-ping, ZHANG Jin-song, WU Feng-shun, et al. Electromigration of SnAgCu Solder Interconnects[J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2006, 27(6): 1136-1140.
- [11] SOMAIAH N, KUMAR P. Effect of Thermomigration-Electromigration Coupling on Mass Transport in Cu Thin Films[J]. Journal of Electronic Materials, 2020, 49(1): 96-108.
- [12] SRAVANTHI S S, ACHARYYA S G, CHAPALA P. Effect of GMAW-Brazing and Cold Metal Transfer Welding Techniques on the Corrosion Behaviour of Aluminium-Steel Lap Joints[J]. Materials Today: Proceedings, 2019, 18: 2708-2716.
- [13] LI Rui-di, YUAN Tie-chui, LIU Xiao-jun, et al. Enhanced Atomic Diffusion of Fe-Al Diffusion Couple during Spark Plasma Sintering[J]. Scripta Materialia, 2016, 110: 105-108.
- [14] 王树文. 铝/钢连续驱动摩擦焊锥形接头形式下力学性能及组织研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2021.
WANG Shu-wen. Study on Mechanical Properties and Microstructure of Conical Joints of Aluminum/Steel Continuous Drive Friction Welding[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2021.
- [15] MESHRAM S D, MADHUSUDHAN REDDY G. Friction Welding of AA6061 to AISI 4340 Using Silver Interlayer[J]. Defence Technology, 2015, 11(3): 292-298.
- [16] REDDY M G, RAO S A, MOHANDAS T. Role of Electroplated Interlayer in Continuous Drive Friction Welding of AA6061 to AISI 304 Dissimilar Metals[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2008, 13(7): 619-628.
- [17] LEE M K, PARK J J, LEE J G, et al. Phase-Dependent Corrosion of Titanium-to-Stainless Steel Joints Brazed by Ag-Cu Eutectic Alloy Filler and Ag Interlayer[J]. Journal of Nuclear Materials, 2013, 439(1-3): 168-173.
- [18] LIU Yong, ZHAO Hai-yan, PENG Yun, et al. Microstructure Characterization and Mechanical Properties of the Continuous-Drive Axial Friction Welded Aluminum/Stainless Steel Joint[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 104(9-12): 4399-4408.
- [19] SUN Min, XIAO Kui, DONG Chao-fang, et al. Effect of Stress on Electrochemical Characteristics of Pre-Cracked Ultrahigh Strength Stainless Steel in Acid Sodium Sulphate Solution[J]. Corrosion Science, 2014, 89: 137-145.
- [20] ZHANG Chang-qing, CUI Guo-sheng, CHEN Bo-yang, et al. Effect of Ag Interlayer on Friction Torque, Mechanical Properties and Microstructure of Large Diameter Aluminum/Steel Joints by Continuous Drive Friction Welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 78: 341-351.