

铜/铝异质金属层状复合板搅拌摩擦焊接技术研究

赵 啸, 高恩志, 徐荣正

(沈阳航空航天大学, 辽宁 沈阳 110136)

摘要: 选用复层占比约 23% 的 6.5 mm 厚铜(复层)/铝(基层)金属层状复合板作为焊接对象, 研究对其进行搅拌摩擦焊接(FSW)的可行性; 同时重点研究焊接工具的作用位置(复层在上和基层在上)对于焊接过程的影响; 此外, 结合有限元模拟技术, 分析 FSW 过程中焊接工具的热力耦合作用对于铜复层流动行为的影响, 以及接头中微观组织, 尤其是界面区组织的变化。结果表明, 在下压量为 0.2 mm、焊接速度为 150 mm/min 和旋转速度为 900 r/min 的焊接参数下, 当采用铝基层在上的焊接方式时, 铜复层侧受焊接工具热机作用影响较弱, 向上迁移作用较小, 并且由于底部作用温度较低、铜复层熔点较高以及导热性较强, 因此容易导致在接头底部形成明显的隧道缺陷; 当铜复层在上时, 可以获得成形良好的 FSW 接头, 由于焊接过程中后退侧和前进侧温度存在差异, 在温度较低的后退侧中的铝-铜界面区域, 仅形成了少量的 Al-Cu 金属间化合物层; 在温度较高的前进侧中铝-铜界面区域, 则由较厚的脆性 Al-Cu 金属间化合物层组成, 该 FSW 接头的平均抗拉强度为 85.2 MPa, 约为母材抗拉强度的 62.7%。

关键词: 铜/铝复合板; FSW; 有限元模拟; 流动行为

中图分类号: TG456.9

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2022)05-1752-07

铜(复层)/铝(基层)异质金属层状复合板作为一种具有较高性价比的异质金属层状复合材料, 因其既有铝密度低、耐蚀性能好的特点, 又具备铜导电、导热性高的优点, 目前已被应用于国防军工、汽车、航空航天、能源电力等诸多领域^[1-6]。焊接是一种应用最为广泛的材料成形工艺之一^[7-9]。因此, 其在促进铜/铝复合板的工程化应用过程中, 必将发挥不可替代的作用^[10-13]。目前, 研究证实铜/铝复合板的熔焊过程中, 由于熔池温度过高, 极易导致铜复层和铝基层之间发生合金化反应, 产生多种危害接头性能的呈连续分布的具有硬脆特性的 Al-Cu 金属间化合物^[14]。此外, 在焊接过程中铜复层容易被稀释破坏, 因而也难以保证接头的力学性能和导电性能^[14,15]。可见, 采用熔焊技术获得性能优良的铜/铝复合板焊接接头存在一定的困难。

搅拌摩擦焊(FSW)作为一种固态焊接方法, 焊接热输入相较于熔焊有很大程度的降低^[16-19]。因此, 在其应用于复合板焊接时, 具有很好的降低接头中基层和复层之间合金化反应程度的潜力。研究结果也初步表明, 采用 FSW 技术可以实现铜/铝异质金属复合板的焊接。例如, Beygi^[20,21]等通过 FSW 实现了铝(1.5 mm)/铜(3 mm)(铜复层占比 66.7%)复合板的焊接; 乔

柯^[22-25]等进行了厚度为 2 mm、铜/铝比例为 1:1 的复合板的 FSW 焊接。通过对接头的组织分析发现, 接头中金属间化合物的数量得到了明显的抑制, 并且铜复层的稀释程度也得到了改善。

但是需要指出的是, 对于铜/铝异质金属复合板而言, 为了既能保证复合板的综合性能(导电性、力学性等), 又能保证其具有良好的性价比, 所以对于价格较高的铜复层所占复合板的比例有一定的要求。例如, 国标(GB/T32468-2015)规定, 铜复层占铜/铝层状复合板的总厚度比要控制在 8%~30%。由于 FSW 是利用高速旋转的焊具与工件摩擦产生热量, 使被焊材料局部达到熔融态, 当焊具向前移动时, 被塑化的材料在焊具的转动摩擦力作用下, 会发生纵向流动, 从而会影响复层的成形性。因此, 复层厚度所占复合板总厚度的比例越低, 对其进行 FSW 焊接的难度将越大。但是目前关于复层占比符合国标(GB/T32468-2015)要求的铜/铝复合板 FSW 的研究, 还鲜有报道。

鉴于铜/铝异质金属复合板焊接的重要性以及目前研究的现状, 选用复层占比较小的铜/铝异质金属复合板作为焊接对象, 研究对其进行 FSW 对接焊接的可行性; 同时, 分析焊接工具的作用位置(复层的放置方式)对于焊接过程的影响; 此外, 结合有限元模拟

收稿日期: 2021-07-09

基金项目: 国家自然科学基金(51601121); 辽宁省自然科学基金(2020-MS-238); 辽宁省兴辽英才计划项目(XLYC2007165)

作者简介: 赵 啸, 男, 1995 年生, 硕士生, 沈阳航空航天大学, 辽宁 沈阳 110136, E-mail: my_revere@163.com

技术研究 FSW 过程中的热力耦合作用对于焊接过程中铜复层流动行为的影响, 以及实验接头中微观组织, 尤其是界面区组织的变化。

1 实 验

在本试验中, 选用符合国标 (GB/T32468-2015) 规定的尺寸为 30 mm (长) × 15 mm (宽) × 6.5 mm (厚) 的 T2 铜/1060 铝异种金属层状复合板 (复层占比约 23%) 作为焊接对象, 其中铜复层厚度为 1.5 mm, 铝基层厚度为 5 mm, 对其进行 FSW。选用的设备为北京赛福斯特公司研制的数控静龙门搅拌摩擦焊机, 选用轴肩为 $\Phi 16$ mm、上 7° 亮面、内凹搅拌头。其中, 搅拌针选用三槽螺纹针, 根部直径为 5.4 mm, 端部直径为 4.4 mm, 搅拌针长度为 6.3 mm。

焊前, 先用 400# 金相砂纸打磨铜/铝复合板表面, 去除氧化膜, 再用丙酮溶液进行清洗, 最后用乙醇擦拭后吹干。然后, 将 2 块铜/铝异质金属复合板沿长度方向对接 (如图 1 所示), 随后将其夹紧、固定。FSW 焊接时, 先采用铜复层在上、铝基层在下, 再采用铝基层在上、铜复层在下的方式, 在相同焊接参数 (下压量为 0.2 mm、焊接速度为 150 mm/min、搅拌头旋转速度为 900 r/min) 下, 分别进行复合板之间的对接焊接。

焊接后, 垂直于试样表面并沿焊缝中心将接头剖开, 作为金相试样。经 240#、400#、600#、800#、1000# 及 1500# 砂纸依次打磨、抛光后, 采用以 2 mL 氢氟酸+3 mL 盐酸+5 mL 硝酸+190 mL 蒸馏水配制成的腐蚀液进行蚀刻, 时间为 5 s。分别采用 Ziess Axio Observer Zlm 型光学显微镜、JSM-6390A 型扫描电子显微镜 (SEM) 对接头宏观形貌、微观组织和界面区成分进行观察和分析。将焊后的铜/铝复合板用线切割机沿垂直于焊缝方向切割, 制备拉伸试样具体尺寸如图 2 所示。最后, 利用 Instron5582 型拉伸试验机进行 FSW 接头强度测试。

基于任意拉格朗日-欧拉 (ALE) 网格自适应技术, 建立 2 种铜/铝异质金属复合板 FSW 有限元模型, 利用质点跟踪技术分析 FSW 过程金属流动行为。质点 p 初始位置设置在铜层, 每个节点释放 200 个子节点^[26]。图 3 是铜复层在上和铝基层在上 2 种焊接方式有限元几何模型。

采用相关 Johnson-Cook 本构模型来描述 FSW 过程高应变速率下材料高温变形的热力学行为:

$$\sigma = \left[A + B(\epsilon_c^p)^n \right] \left[1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}_c}{\dot{\epsilon}_0} \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right) \right] \quad (1)$$

其中 ϵ_c^p , $\dot{\epsilon}_c$ 为等效塑性应变及等效塑性应变率, $\dot{\epsilon}_0$ 为

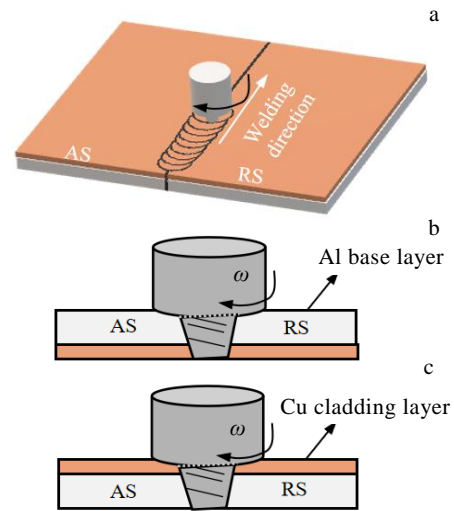


图 1 铜/铝异质金属复合板 FSW 及铝基层和铜复层在上示意图

Fig.1 Schematics of the FSW process (a), Al base plate placed upon the Cu cladding plate (b), and Cu cladding plate placed upon the Al base plate (c) (AS-advancing side, RS-retreating side)

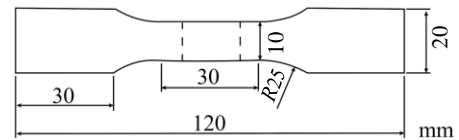


图 2 FSW 接头的拉伸试样尺寸示意图

Fig.2 Schematic of the tensile test specimen

参考应变率 (1.0 s^{-1}), T_r , T_m 为室温及熔点。A, B, n, C 和 m 为材料常数, 如表 1 所示^[27,28]。其他热物理性能随温度变化如表 2 所示^[29]。

2 结果与分析

2.1 铜/铝复合板搅拌摩擦焊接

图 4 是铜/铝异质金属层状复合板 FSW 对接接头的横截面宏观形貌图。其中, 图 4a 和 4b 分别为铜复层在上、铝基层在上的焊接方式下获得的接头形貌。由图 4a 可见, 当铜复层在上时, 复合板 FSW 接头的横截面成形良好, 无明显缺陷, 铜复层呈连续带状分布。此外, 一部分被拉长变形的铜带分布在铝基层一侧。而由图 4b 可见, 当铝基层在上时, 在接头底部出现了明显的隧道缺陷 (图 4b 中 F 区)。

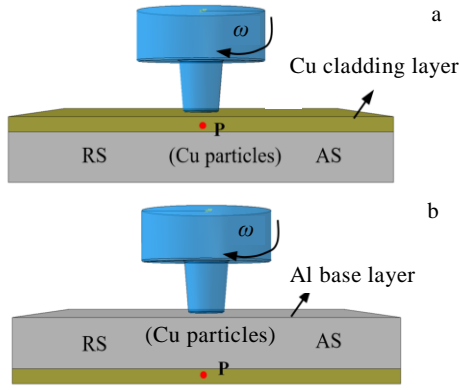


图 3 铜复层在上和铝基层在上 2 种焊接方式下有限元几何模型

Fig.3 Schematics of geometric model in two modes of Cu cladding layer up (a) and Al base layer up (b)

表 1 1060 铝及 T2 紫铜 Johnson-Cook 模型的材料常数

Table 1 Material constants in Johnson-Cook model for 1060 Al and T2 Cu^[27, 28]

Material	A/MPa	B/MPa	C	n	m	$T_m/^\circ\text{C}$	$T_p/^\circ\text{C}$
1060 Al	128	301	0.011	0.2	1.34	650	20
T2 Cu	90	292	0.025	0.31	1.09	1083	20

表 2 1060 铝及 T2 紫铜性能参数

Table 2 Properties parameters of 1060 Al and T2 Cu materials used in model^[29]

Material	Thermal conductivity, $\lambda/\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	Specific heat, $c/\text{J (kg K)}^{-1}$	Density, $\rho/\text{g cm}^{-3}$
1060 Al	175.8	700	2.7
T2 Cu	371	442	8.96

2.2 微观组织分析

由于铝基层在上时，获得的接头内部存在明显的隧道缺陷，因此本节重点对铜复层在上时获得的铜/铝复合板 FSW 接头进行微观组织的进一步分析。

图 5 是铜复层在上时复合板 FSW 接头中后退侧 Al-Cu 接触界面（图 4a 中 A、B 区域）的高倍 SEM 照片。从图中可见，Al-Cu 接触界面位置存在一层呈灰色的过渡层（图 5a 和 5b）。图 5c 是图 5a 中 G 区的高倍 SEM 照片，可以明显看到在铜复层和铝基层结合面上存在明显的由连续块状金属间化合物组成的过渡区域。根据 EDS 结果显示（表 3 中点 a 和 b），图 5c

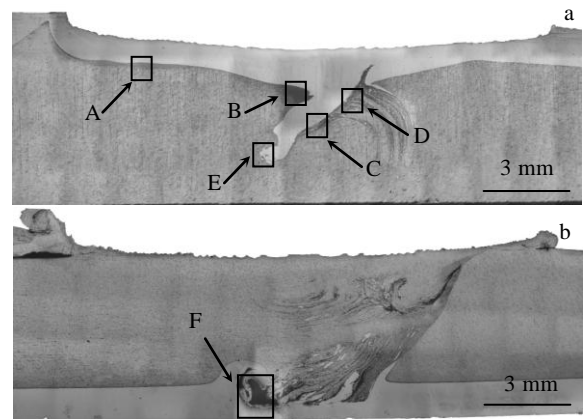


图 4 铜复层在上和铝基层在上 FSW 接头宏观截面形貌
Fig.4 Cross section morphologies of the FSW joint of Cu cladding layer up (a) and Al base layer up (b)

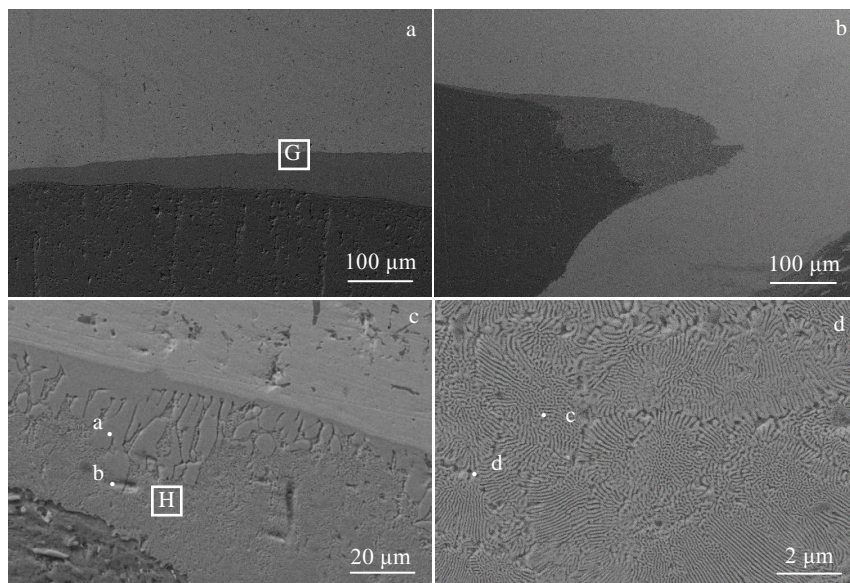


图 5 图 4a 中 A 区域和 B 区域及图 5a 中 G 区和图 5c 中 H 区的 SEM 照片

Fig.5 SEM images of region A (a) and region B (b) in Fig.4a; zone G in Fig.5a (c); zone H in Fig.5c (d)

表 3 焊接接头不同位置的 EDS 结果

Table 3 EDS results of different positions of FSW joints (at%)

Position	Al	Cu
a (Fig.5c)	66.1	33.9
b (Fig.5c)	66.8	33.2
c (Fig.5d)	68.6	31.4
d (Fig.5d)	94.9	5.1
e (Fig.6b)	96.6	3.4
f (Fig.6b)	66.8	33.2
g (Fig.8b)	67.7	32.3
h (Fig.11)	69.7	30.3
i (Fig.11)	68.8	31.2

中 a 点成分为 66.1at% Al 和 33.9at% Cu。此外, 在临近铝侧的过渡区域可以观察到大量条纹状共晶组织 (图 5d)。依据 EDS 结果 (表 3 中点 b、c 和 d), 结合铝-铜二元相图, 可以推测出该块状金属间化合物应为 Al_2Cu , 而条纹状共晶组织可能为 $(Al_2Cu+\alpha-Al)$ 共晶组织。

图 6 是铜复层在上时获得的复合板 FSW 接头中前进侧中 Al-Cu 界面 SEM 照片。其中, 图 6a 是图 4a 中 C 区域的高倍 SEM 照片。由图可见, 在铜复层和铝基层结合面上存在明显的过渡区域, 该区域由一层较厚的金属间化合物和一层较细的颗粒状共晶组织组成。通过进一步对颗粒状共晶组织区域进行分析可见, 该区域是由亮白色共晶组织和暗灰色的相组成 (图 6b)。结合 EDS 结果 (表 3 中点 e、点 f) 和相图分析可见, 颗粒状共晶组织亮白部分为 Al_2Cu , 而灰暗部分可能为 $\alpha-Al$ 。

图 7 是铜复层在上时获得的 FSW 接头中前进侧 Al-Cu 界面 (图 4a 中 D 区域) 的高倍 SEM 照片。从图中可以看出, 在接头前进侧中近轴肩位置存在带状结构, Cu 在 Al 层中延伸, 条带由不同大小的颗粒片

层组成 (图 7a)。结合 EDS 分析可见 (图 7b、7c), 在带状结构区域内, Cu 元素呈片状和颗粒状, 较为均匀地分散在铝基层中, 并且发生了明显的 Al 与 Cu 元素之间的扩散, 同时在 Cu 颗粒片层与 Al 的界面处存在明显 Al-Cu 扩散区。

图 8 是铜复层在上时获得的复合板 FSW 接头钩状区域 (图 4a 中 E 区域) 的高倍组织。由图 8a 中沿 L 标注线的 EDS 线扫描结果可见 (图 8a), 在钩状区域底部被塑化成条状的 Cu 两侧, 存在明显的铝、铜元素相互扩散现象, 这也进一步证明在该区域铝和铜发生了化合反应。图 8b 是图 8a 中 K 区的高倍 SEM 形貌, 可以观察到钩状区域中明显存在一层较薄的过渡层, 结合图 8b 中 g 点 EDS 结果 (表 3), 该过渡层的成分应为 Al_2Cu 。

综合上述分析可见, 当铜复层在上时, 在 FSW 接头后退侧和底部钩状区, 铜与铝界面之间仅生成了少量的 Al-Cu 金属间化合物薄层; 而前进侧中铝与铜界面则由较厚的脆性 Al-Cu 金属间化合物层和较细的颗粒状共晶组织组成。

2.3 搅拌摩擦焊接头力学特征

拉伸实验结果显示, 铜在上时获得的铜/铝异质金属复合板 FSW 对接接头的平均抗拉强度为 85.2 MPa, 母材的平均抗拉强度为 135.8 MPa, 接头抗拉强度约为母材强度的 62.7% (图 9)。接头的断裂位置位于前进侧铝铜界面处 (图 10)。图 11 是铜/铝异质金属复合板 FSW 接头的断口高倍形貌, EDS 结果显示, 断裂处 h 和 i 点成分分别为 69.7at% Al、30.3at% Cu 和 68.8at% Al、31.2at% Cu (表 3 中点 h、i)。上述结果也进一步证实接头断裂是沿前进侧中铝-铜界面区中较厚 Al-Cu 金属间化合物和颗粒状共晶组织处发生的。换言之, Al-Cu 金属间化合物和颗粒状共晶组织降低了接头的力学性能, 是接头的薄弱区域。

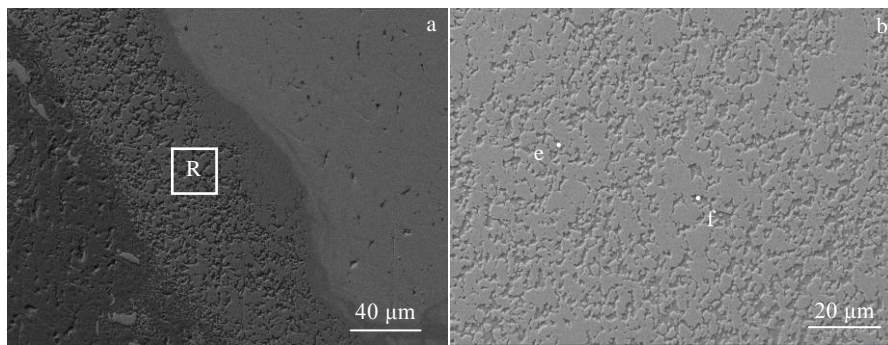


图 6 图 4a 中 C 区域和图 6a 中 R 区的 SEM 照片

Fig.6 SEM images of region C in Fig.4a (a) and zone R in Fig.6a (b)

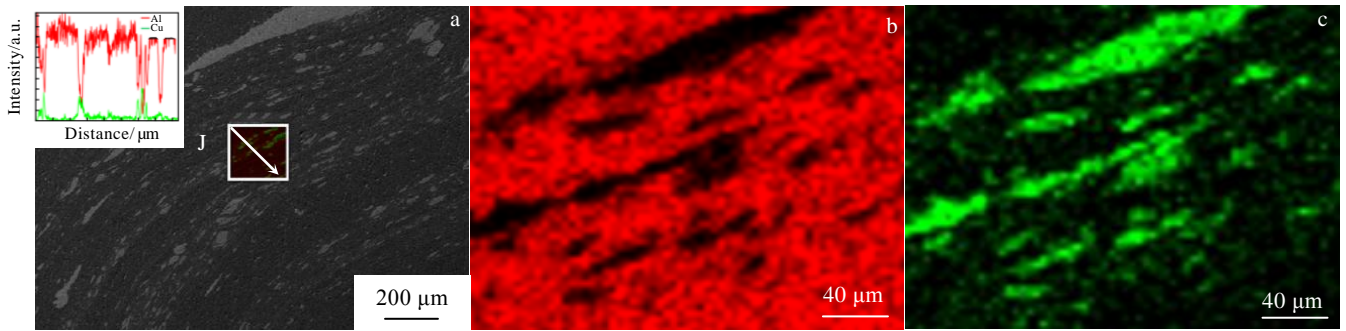


图 7 图 4a 中 D 区域的 SEM 照片和沿 J 区对角线的 EDS 元素 Al, Cu 线扫描及图 7a 中 J 区铝和铜元素的分布

Fig.7 SEM image of region D in Fig.4a and EDS line scanning of Al, Cu along the diagonal of zone J (a); Al (b), Cu (c) element distributions of zone J marked in Fig.7a

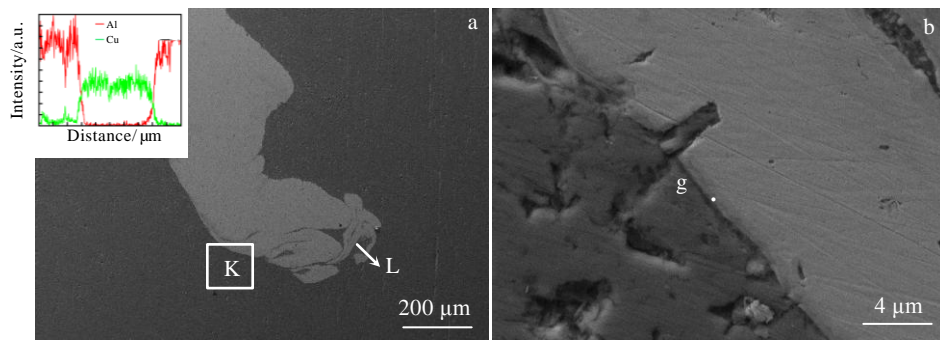


图 8 图 4a 中 E 区域 SEM 和沿 L 线的 EDS 元素 Al, Cu 线扫描及图 8a 中 K 区的 SEM 照片

Fig.8 SEM image of region E in Fig.4a and EDS line scanning of Al, Cu along L line marked (a); SEM image of zone K in Fig. 8a (b)

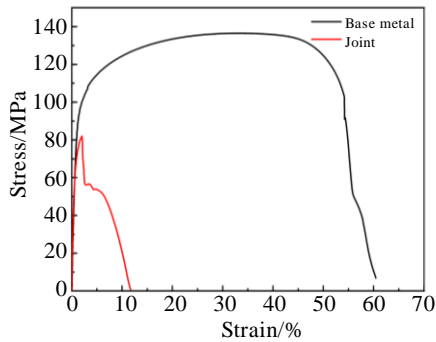


图 9 母材和 FSW 接头应力-应变曲线

Fig.9 Stress-strain curves of the base material and FSW joint

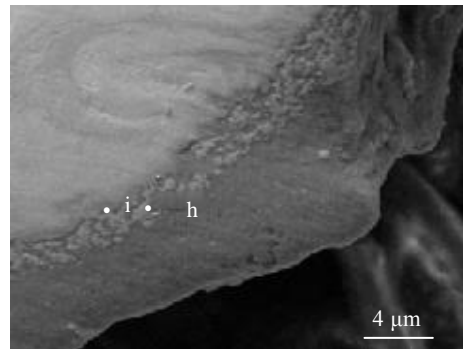


图 11 对接接头的断裂位置高倍 SEM 照片

Fig.11 SEM morphology of FSW joint

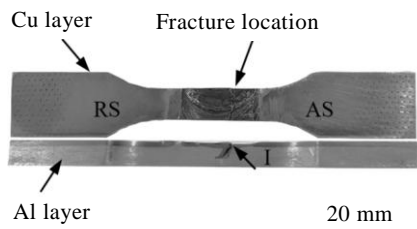


图 10 对接接头的典型断裂位置

Fig.10 Typical fracture location of the butt joint

2.4 铜复层材料流动行为及接头组织演变特征分析

由于铜的熔点较高、散热较快，而在 FSW 过程中底部的热机作用较弱，当采用铝基层在上的方式进行 FSW 时，因为熔点较高、散热较快的铜复层在下，所以会导致铜的流动性比铝弱，不能充分向上迁移与 Al 结合，接头成形相较于铜复层在上时存在较大差距，容易在接头底部形成隧道缺陷（图 4 中 F 区域），有限元模拟结果也证实了上述结果和分析（图 12b）。

当采用铜复层在上的方式进行铜/铝异质金属复合板 FSW 时, 由于铜复层厚度占总厚度比较低, 被塑化的铜层在焊具的转动摩擦力和轴肩、搅拌针热循环作用下, 更容易发生合金化反应, 生成金属间化合物。轴肩、前进侧和后退侧上层 Cu 复层受搅拌头搅拌挤压双重作用, 沿垂直方向向下层 Al 侧迁移, 并以环形方式流动, 有限元结果 (图 12a) 显示, 当铜复层在上时, 铜侧质点在搅拌头作用下有明显向下迁移趋势 (图 4a); 当铜复层在下时, 铜侧质点受搅拌头作用较弱, 向上迁移作用较弱, 与实验结果一致。近轴肩区域材料受搅拌头、轴肩摩擦热双重影响, 温度较高, 焊接过程中生成了 Al-Cu 块状金属间化合物和条纹状共晶组织 (图 4a 与 4b)。上层 Cu 复层因受搅拌头的强热机作用而被搅碎, 与向上迁移的 Al 混在一起, 导致上层铜复层与下层铝基层发生漩涡状混合, 同时在 Cu 颗粒片层与 Al 的结合处发生了明显的 Al-Cu 元素扩散, 生成了 Al-Cu 金属间化合物。

搅拌头的前进会导致在搅拌头后方形成空腔, 在轴肩、垫板和周围未发生塑化金属的限制作用下, 被塑化的 Al、Cu 金属层会随搅拌针的旋转向后流动,

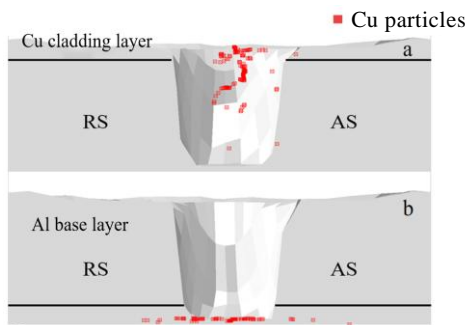


图 12 铜复层在上和铝基层在上 2 种固定方式下铝/铜复合板 FSW 接头质点空间分布

Fig.12 Spatial distribution of FSW Al/Cu composite plates joints tracer particles with two modes of Cu cladding layer up (a) and Al base layer up (b)

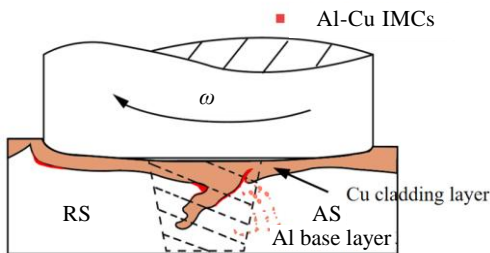


图 13 焊接接头中 Al-Cu 元素分布特征示意图

Fig.13 Schematic of Al and Cu elements distribution in the FSW joint

瞬间填满空腔, 形成致密的焊缝。在 Al、Cu 金属层流动过程中, 由于 Cu 的密度比 Al 大, 流动性弱于 Al, 导致后退侧只有极少量 Cu 分布, FSW 过程中主要发生 Al 的向后流动, 且由于后退侧和底部钩状区域主要受搅拌头机械摩擦作用的影响, 金属温度较前进侧低, 因此在铝-铜结合界面位置仅生成了少量的 Al-Cu 金属间化合物层 (图 13 中后退侧); 而在前进侧中一部分 Al、Cu 会向前流动, 也有一部分向后流动, 并在该侧发生较大的混合, 由于受搅拌头机械搅拌和焊接热循环的作用, 金属温度较高, 因此生成了较厚的脆性 Al-Cu 金属间化合物层和较细的颗粒状共晶组织 (图 13 中前进侧), 降低了前进侧铝-铜过渡区域的力学性能, 导致该区域成为接头的薄弱区。

3 结 论

1) 采用下压量为 0.2 mm、焊接速度为 150 mm/min 和旋转速度为 900 r/min 的焊接参数, 当铜复层在上时, 获得的对接接头的横截面成形良好, 无明显缺陷, 带状结构和拉长变形的铜块分布在铝基层中; 而当铝基层在上时, 在接头底部出现了明显的隧道缺陷。

2) 铜复层在上时, FSW 接头后退侧中临近轴肩处铝-铜接触界面上存在由块状金属间化合物和条纹状 ($Al_2Cu + \alpha-Al$) 共晶组织构成的过渡区域; 在后退侧和底部钩状区域中的铝-铜界面处仅生成了少量的 Al-Cu 金属间化合物层; 而前进侧中铝-铜界面由较厚的脆性 Al-Cu 金属间化合物层; 此外, 前进侧中临近轴肩处被搅碎的 Cu 呈片状和颗粒状, 分散在 Al 层中, 并且发生了明显的 Al-Cu 元素扩散现象。

3) 铜复层在上时获得的铜/铝复合板 FSW 接头的平均抗拉强度为 85.2 MPa, 约为母材平均强度 (135.8 MPa) 的 62.7%, 断裂是沿接头前进侧中铝-铜过渡区域中较厚 Al-Cu 金属间化合物和颗粒状共晶组织处发生的。

参考文献 References

[1] Xu Tao(徐 涛). *Light Alloy Fabrication Technology*(轻合金加工技术)[J], 2012, 40(6): 7

[2] Beygi R, Kazeminezhad M, Mehrizi M Z *et al. International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2016, 88(1-4): 1

[3] Song Youbao(宋友宝), Li Long(李 龙), Zhou Dejing(周德敬). *Welding & Joining*(焊接)[J], 2016, 10: 18

[4] Liu Xiaotao(刘晓涛), Zhang Yanan(张延安), Cui Jianzhong(崔建忠) *et al. Materials Review*(材料导报)[J], 2002, 16(7): 41

[5] Gou N N, Zhang J X, Wang J L *et al. Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2017, 26(4): 1801

[6] Long Weimin(龙伟民), Zhao Yue(赵 月), Zhong Sujuan(钟素娟) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料)

- 料与工程[J], 2021, 50(1): 7
- [7] Liu Yong(刘永), Zhao Haiyan(赵海燕), Peng Yun(彭云) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2021, 50(3): 795
- [8] Sun Zhenbang(孙振邦), Han Yongquan(韩永全), Du Maohua(杜茂化) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2020, 49(8): 2674
- [9] Zhou Dongli(邹东利), Chen Xianglin(陈向林), Xiao Dawu(肖大武) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2019, 48(9): 2951
- [10] Ke Liming(柯黎明), Liu Geping(刘鹤平), Xing Li(邢丽) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2004, 14: 1534
- [11] Shen Z, Chen Y, Haghshenas M *et al. Materials Characterization*[J], 2015, 104: 1
- [12] Kannan T, Murugan N. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2006, 176(1): 230
- [13] Spowage T A M C. *Materials Science and Engineering A*[J], 2004, 374(1-2): 224
- [14] Li F S, Wei Z C, Xu R Z *et al. Journal of Materials Design and Applications*[J], 2021, 235(3): 640
- [15] Li F S, Xu R Z, Wei Z C *et al. Transactions of the Indian Institute of Metals*[J], 2020, 73(2): 353
- [16] Liu Jingxuan(刘敬萱), Shen Jian(沈健), Li Xiwu(李锡武) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2019, 48(12): 3797
- [17] Wan Xinyong(万心勇), Wan Zhili(胡志力), Pang Qiu(庞秋) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2019, 48(6): 1990
- [18] Li Peiqi(李佩琪), You Guoqiang(游国强), Guo Wei(郭伟) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2019, 48(5): 1551
- [19] Chen Chao(陈超), Li Qinglin(李庆庆), Lin Sanbao(林三宝) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2019, 48(3): 775
- [20] Beygi R, Kazeminezhad M, Kokabi A H. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2012, 22(12): 2925
- [21] Beygi R, Kazeminezhad M, Kokabi A H. *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2014, 45(1): 361
- [22] Qiao Ke(乔柯), Wang Kuaishe(王快社), Wang Wen(王文) *et al. Journal of Aeronautical Materials*(航空材料学报)[J], 2017, 37(5): 35
- [23] Qiao Ke(乔柯), Wang Wen(王文), Wu Nan(吴楠) *et al. Heat Treatment of Metals*(金属热处理)[J], 2016, 41(7): 55
- [24] Qiao Ke(乔柯), Wang Wen(王文), Wu Nan(吴楠) *et al. Materials Reports*(材料导报)[J], 2016, 30(12): 86
- [25] Wu Nan(吴楠). *Dissertation for Master*(硕士论文)[D], Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013
- [26] Gao Enzhi, Zhang Xingxing, Liu Chungzhong *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2018, 18: 2324
- [27] Sonika S, Dehi P M, Manmohan D G *et al. Materials Today: Proceedings*[J], 2018, 5: 5349
- [28] Jia Yunhai(贾云海), Quan Chonghao(权崇豪), Guo Jianmei(郭建梅) *et al. Superhard Material Engineering*(超硬材料工程)[J], 2019, 31(6): 6
- [29] Hamed P, Jamal T, Abolfazl M. *Materials & Design*[J], 2014, 55: 619

Research on Friction Stir Welding Technology of Al-Cu Composite Plates

Zhao Xiao, Gao Enzhi, Xu Rongzheng
(Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

Abstract: In this research, 6.5 mm thick Al/Cu composite plates with Cu cladding plate fraction of 23% were selected for friction stir welding (FSW). The influence of welding position (Cu cladding plate up and Al base plate up) on the welding process was investigated emphatically. In addition, the influence of thermo-mechanical coupling on the flow behavior of Cu cladding plate, the microstructure evolution mechanisms in the welded joint, especially the interfacial microstructure were analyzed combined with numerical simulation technology. The results show that when Al base plate is placed upon the Cu cladding plate, the tunnel defect is created under the process parameters of 0.2 mm plunge depth, 900 r/min rotation speed and 150 mm/min welding speed in the weld joint, because of the weakly influence of the action of thermal mechanical coupling on the Cu cladding plate, the weakly interaction of upward migration, the lower temperature effect on high-melting point high-conductivity copper cladding plate. When Cu cladding plate is placed upon the Al base plate, the joint with perfect appearance could be prepared under the same welding parameters. Due to the temperature variations of the advancing side and the retreating side during the FSW process, a small number of Al-Cu intermetallic compound interlayer are formed in the Cu/Al interface of the lower temperature retreating side and hook zone, and the thick Al-Cu intermetallic compound interlayer is formed in the Cu/Al interface of the higher temperature advancing side. The average tensile strength of the joint is 85.2 MPa, which is about 62.7% of the tensile strength of the base metal.

Key words: Al/Cu composite plates; FSW; numerical simulation; flow behavior

Corresponding author: Xu Rongzheng, Ph. D., School of Materials Science and Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, P. R. China, Tel: 0086-24-89724198, E-mail: rzxu@imr.ac.cn