

转速对铝铜异种材料水下搅拌摩擦焊接接头组织与性能的影响

Effect of rotation speed on microstructure and properties of dissimilar submerged friction stir welding joints of aluminium and pure copper

王盈辉^{1,2}, 王快社^{1,2}, 王文^{1,2}, 彭湃^{1,2}, 车倩颖^{1,2}, 乔柯^{1,2}

(1 西安建筑科技大学 治金工程学院, 西安 710055; 2 西安建筑科技大学 功能材料加工国家地方联合工程研究中心, 西安 710055)

WANG Ying-hui^{1,2}, WANG Kuai-she^{1,2}, WANG Wen^{1,2},
PENG Pai^{1,2}, CHE Qian-ying^{1,2}, QIAO Ke^{1,2}

(1 School of Metallurgical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2 National and Local Joint Engineering Research Center for Functional Materials Processing, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

摘要: 采用水下搅拌摩擦焊接(submerged friction stir welding, SFSW)技术对 2024-T4 铝合金和紫铜进行连接, 研究转速对接头微观组织与力学性能的影响。结果表明:接头成型良好,无裂纹、孔洞等缺陷。随转速升高,接头表面平整度提高,大量铜被卷入焊核区(nugget zone, NZ),NZ 组织结构逐渐混乱。SFSW 过程中,冷却水有效抑制了晶粒粗化和脆性金属间化合物生成。当转速为 750r/min 时,接头抗拉强度为 227MPa,达到铜母材的 70.3%,随转速增大,接头的抗拉强度和伸长率降低。

关键词: 水下搅拌摩擦焊接; 2024 铝合金; 紫铜; 微观组织; 力学性能

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2018.000446

中图分类号: TG457.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2019)11-0155-08

Abstract: 2024-T4 aluminium alloy and pure copper were welded by submerged friction stir welding (SFSW) and the effect of rotation speed on microstructure and mechanical properties of SFSW joints was studied. The results indicate that the SFSW joint is well formed, without cracks, holes and other defects. With the increase of rotation speed, the surface of the SFSW joint is smooth and the smoothness is improved. Meanwhile a large number of copper is involved in the nugget zone (NZ), and the structure in NZ is gradually disordered; the forced cooling effect of water effectively inhibits the formation of grain coarsening and brittle intermetallic compound during SFSW; the tensile strength of joint is 227MPa, which is 70.3% of the tensile strength of the copper base metal(BM) at the rotational speed of 750r/min and the tensile strength and elongation of the SFSW joint decrease with the increase of rotation speed.

Key words: submerged friction stir welding; 2024 aluminium alloy; pure copper; microstructure; mechanical property

2024 铝合金具有强度高、质量轻、耐热性好、耐损伤等特点,广泛应用于飞机、汽车、船舶等构件中^[1]。紫铜具有优良的导热、导电、耐蚀性能且加工、铸造、焊

接等工艺性能良好,广泛应用于机械、冶金、国防等工业^[2]。为了充分发挥铝合金和紫铜各自的优异性能,两种金属的连接需求日益增多,如大容量发电机组的

母线、变压器的导电零部件、化工容器等,都采用铝铜异种金属连接构件代替全铜件,不但能减轻构件质量、节约材料、降低生产成本,而且还能满足构件的强度要求^[3-5]。

通常采用熔化焊、钎焊、压力焊等技术实现铝铜异种材料的连接,但是由于铝和铜的物理与化学性能差异较大,因此在熔化焊、钎焊、压力焊等常规焊接过程中存在诸多问题。采用熔化焊时,由于铝、铜的熔点差异大,熔化焊时铝与铜难以均匀熔合,接头处易形成气孔、裂纹等缺陷^[6],同时,铜、铝在焊接时容易产生脆性金属间化合物,影响焊接接头的强度和塑性^[7];由于铝、铜之间的电极电位相差较大,难以进行钎焊,且易造成钎料无法填满钎缝,接头易受腐蚀等问题;而利用压力焊进行焊接时,工艺繁杂,对焊件表面要求较高,限制了其在工程结构中的应用。

搅拌摩擦焊(friction stir welding, FSW)是英国焊接研究所于1991年发明的一种固相连接技术^[8]。与传统的熔焊技术相比,FSW可用于焊接难熔材料以及物理和力学性能差异较大的异种材料,具有诸多优点,例如焊接峰值温度低于被焊金属熔点,而且具有操作简便、优质高效、焊接变形小、能耗低、无污染等特点。目前,FSW已成功应用于铝合金、铜合金、镁合金、复合材料以及异种材料的焊接,具有巨大的发展潜力和广阔的应用前景。

近年来,国内外对异种材料的FSW开展了大量工作,结果表明,异种材料可以通过FSW得到有效连接,但在FSW过程中易形成大量的金属间化合物,从而导致接头失效,因此,控制金属间化合物的形成是目前研究的热点。针对该问题,Abdollah-Zadeh等^[9-10]对镁铝异种材料进行水下搅拌摩擦焊(submerged friction stir welding, SFSW),研究发现,与空气中FSW的峰值温度(435℃)相比,SFSW可加速热耗散,减弱热循环,有效降低焊核区峰值温度(389℃),从而减少金属间化合物的生成,改善接头的组织性能。同时,他们对比了空气中FSW与SFSW AZ31镁合金和AA5083 H34铝合金焊接接头的力学性能,研究发现,SFSW接头抗拉强度(167MPa)明显高于空气中FSW接头强度(104MPa)。Zhao等^[11]也对比研究了6013铝合金和AZ31镁合金异种材料FSW与SFSW接头的力学性能,结果表明:SFSW接头与空气中FSW对比(131MPa)具有更高的抗拉强度(152MPa)。Zhang等^[12]对6061铝合金和紫铜异种材料进行了焊接,对比分析了FSW和SFSW接头的组织性能,研究表明:与FSW接头相比,SFSW接头中金属间化合物的含量明显减少,且铝铜界面的扩散层厚度由18μm减小

到2μm。

目前,国内外学者^[13-16]针对SFSW开展了诸多研究,但关于铝铜异种材料SFSW的研究较少,尤其是很少涉及工艺参数对焊接接头微观组织和力学性能的影响的研究。因此,本工作主要开展了铝铜异种材料SFSW研究,在表征焊接接头微观组织的基础上,重点研究了转速对铝铜异种材料SFSW接头力学性能的影响,以期为铝铜异种材料高效优质连接提供理论指导和技术支持。

1 实验材料与方法

实验选用2mm厚的2024-T4铝合金(Al-4.41Cu-1.61Mg-0.27Fe-0.59Mn-0.17Si,质量分数/%)和紫铜板材,其抗拉强度分别为533,323MPa,伸长率分别为21.2%,53.6%。

SFSW实验在改造的X5032型立式升降台铣床上进行。圆柱带螺纹搅拌头材料为W18Cr4V,轴肩直径为12mm,搅拌针直径为3.4mm,高度为1.8mm,压下量为0.2mm。焊接速率恒定为47.5mm/min,转速分别为750,1180,1500r/min,对应的样品分别命名为SFSW-750,SFSW-1180和SFSW-1500。SFSW时将铝合金置于前进侧(advancing side, AS),紫铜置于后退侧(retreating side, RS),搅拌针向铝侧偏移1mm。焊接时,将被焊接材料用压板固定在冷却水槽内,采用循环水冷却,水流速率为0.15L/s。焊接示意图如图1所示。

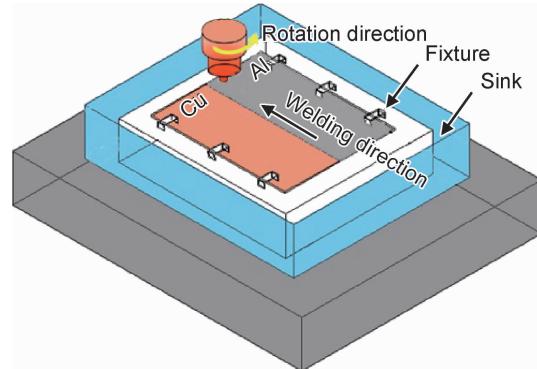


图1 水下搅拌摩擦焊接示意图

Fig. 1 Diagram of submerged friction stir welding

垂直于焊接方向截取金相试样,经磨制和抛光后进行浸蚀。铝侧采用的腐蚀液为Keller试剂(150mL H₂O+3mL HNO₃+6mL HCl+6mL HF),铜侧采用20mL C₂H₅OH+6mL HCl+150mL H₂O+10g FeCl₃混合溶液。腐蚀后利用PLOVER-MET型光学

显微镜观察接头微观组织。采用 Bruker-D8 Advance X 射线衍射仪进行物相分析。利用 401MVD 型显微硬度仪测试硬度, 加载载荷为 2N, 保压时间为 10s。测试位置距离上表面 1mm, 测试间隔为 0.5mm。采用 Instron-8801 电子拉伸试验机进行室温拉伸实验, 拉伸速率为 0.5mm/min。垂直于焊接方向切取拉伸试样, 试样尺寸如图 2 所示, 每组平行试样数量为 3 个。采用 JSM-6390A 型扫描电镜进行微观组织观察和断口分析。

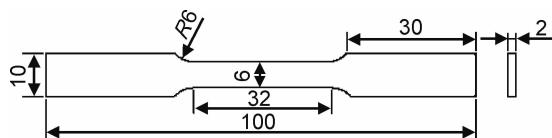


图 2 拉伸试样尺寸

Fig. 2 Dimension of tensile specimen

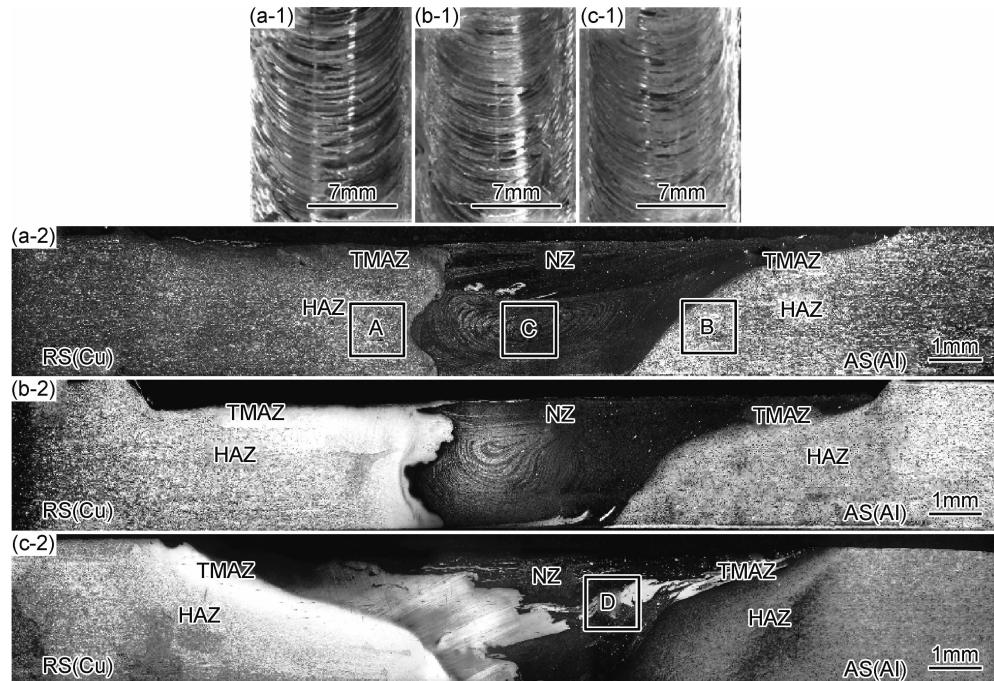


图 3 不同转速下 SFSW 接头表面(1)及横截面(2)宏观形貌

(a)SFSW-750; (b)SFSW-1180; (c)SFSW-1500

Fig. 3 Macroscopic appearances of surface (1) and cross-section (2) of SFSW joints at different rotation speeds
(a)SFSW-750; (b)SFSW-1180; (c)SFSW-1500

合结构, 还分布较多的铜颗粒和大尺寸的铜块。涡流状结构为典型的“洋葱环”形貌, “洋葱环”组织形态的形成是由于在焊接过程中, 材料在搅拌头的旋转和移动共同作用下不断流动, 同时受到搅拌轴肩的挤压造成的。随着转速的升高, 搅拌针与被焊件产生的摩擦总热量越多, 促进两种材料的塑性流动, 铝铜两种材料混合更加剧烈, NZ 区域不断扩大。同时, 由于铜的熔点较高, 随热输入的增大, 大量的铜被搅拌针带入

2 结果与分析

2.1 组织形貌

2.1.1 宏观形貌

图 3 所示为焊接接头表面和横截面形貌。由图 3 可见, 铝合金与紫铜焊接接头无孔洞、沟槽、裂纹等缺陷, 随转速升高, 表面越来越光滑平整。根据焊接接头微观组织特点, 接头可分为焊核区(nugget zone, NZ)、热力影响区(thermomechanically affected zone, TMAZ)、热影响区(heat affected zone, HAZ)以及母材(base metal, BM)组成。由图 3 可见, NZ 与 AS 分界线明显, 出现这种现象的原因主要与焊接时塑性金属在两侧的流动方式和流动速率的差异性有关^[17], 同时, NZ 的铝/铜材料经过搅拌, 呈现一种紊乱的混合状态, 除了形成不同尺寸的片层状和涡流状的铝、铜混

NZ, 导致该区域结构逐渐混乱。

2.1.2 微观组织

图 4 所示为 SFSW 接头 BM 及图 3 所示 A,B,C, D 各区域对应的微观组织形貌。紫铜为典型的轧制组织, 平均晶粒尺寸为 $32\mu\text{m}$ (图 4(a))。铝合金平均晶粒尺寸为 $24\mu\text{m}$ (图 4(b))。图 4(c),(d)分别是在 SFSW-750 铜侧和铝侧 HAZ, TMAZ 显微组织。HAZ 由于受热循环及冷却水的抑制作用, 铝侧 HAZ

晶粒没有明显长大,平均晶粒尺寸为 $26\mu\text{m}$ 。由于铜的导热率较大,导热速率大,铜侧 HAZ 平均晶粒尺寸达到 $48\mu\text{m}$ 。TMAZ 晶粒受到搅拌工具的机械作用,发生一定的塑性变形。SFSW-1180,SFSW-1500 呈现

相同的趋势。图 4(e)是 SFSW-750 的 NZ 微观形貌,为显著的“洋葱环”结构。SFSW-1500 的 NZ 组织较混乱,出现不连续的片层结构、铜块以及大量的铜颗粒(图 4(f))。

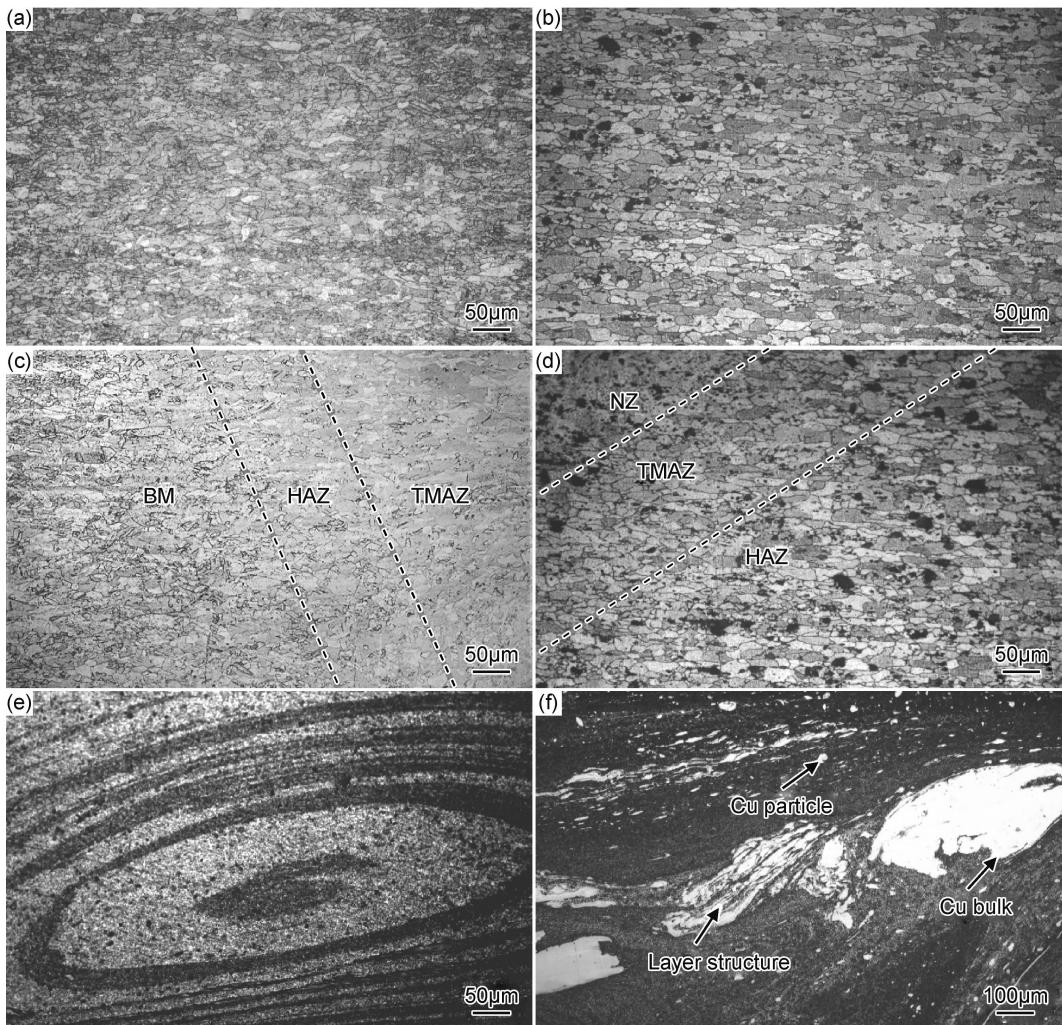


图 4 SFSW 接头微观形貌 (a)紫铜;(b)2024 铝合金;(c)图 3(a-2)区域 A;
(d)图 3(a-2)区域 B;(e)图 3(a-2)区域 C;(f)图 3(c-2)区域 D

Fig. 4 Microscopic appearances of SFSW joints (a)pure copper;(b)2024 aluminium alloy;(c)region A in fig. 3(a-2);
(d)region B in fig. 3(a-2);(e)region C in fig. 3(a-2);(f)region D in fig. 3(c-2)

2.2 XRD 及 EDS 分析

图 5 为 SFSW 异种接头 NZ 的 XRD 图谱。结果表明,接头主要由 Al_2Cu ,Al 和 Cu 组成。这是因为,首先,在焊接时,搅拌针与工件间的摩擦热使接头温度升高,从而使铝铜 NZ 具备形成铝铜金属间化合物的温度条件(Al-Cu 共晶熔点 552°C)^[11,18];另外,NZ 的铝与铜在搅拌针的作用下混合,材料的剧烈塑性变形会增加晶格缺陷和位错密度,进而促进原子的扩散^[17]。二者的综合作用使接头形成金属间化合物^[19]。但是,焊接过程在水下进行时,外部液体将峰值温度降

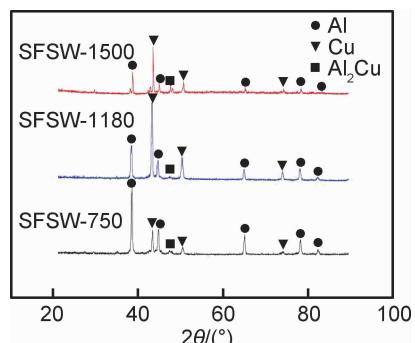


图 5 SFSW 接头 X 射线衍射图谱
Fig. 5 XRD patterns of SFSW joints

低,同时,水也加快了冷却速率。研究者们^[3,20-21]对铝铜在空气中进行 FSW,研究发现,接头不仅有 Al,Cu,还有 Al₂Cu,Al₄Cu₉,AlCu 金属间化合物生成。因此,与空气中的 FSW 相比,SFSW 的 Al-Cu 金属间化合物生成受到抑制。随着转速的增加,Al₂Cu 的衍射峰强度越来越高。图 6 为不同转速下铝铜结合界面处的 EDS 线扫描。可以看出,金属间化合物层厚度与转速无明显线性关系。另外,不同转速下,SFSW 铝铜界面

处均形成金属间化合物层,最小厚度达 0.5 μm,而在空气中进行铝铜 FSW 所形成的金属间化合物层均比较厚,如 Avettand-Fenoël 等^[22]在空气中对 AA 6082 铝合金及纯铜进行焊接,发现金属间化合物层厚度达 3 μm;Muthu 等^[23]对 AA 1100 铝合金和纯铜进行异种焊接所形成的金属间化合物层厚度为 1.7~3.4 μm。因此,SFSW 可以有效减小铝铜金属间化合物层的厚度,从而减少脆性铝铜金属间化合物的生成。

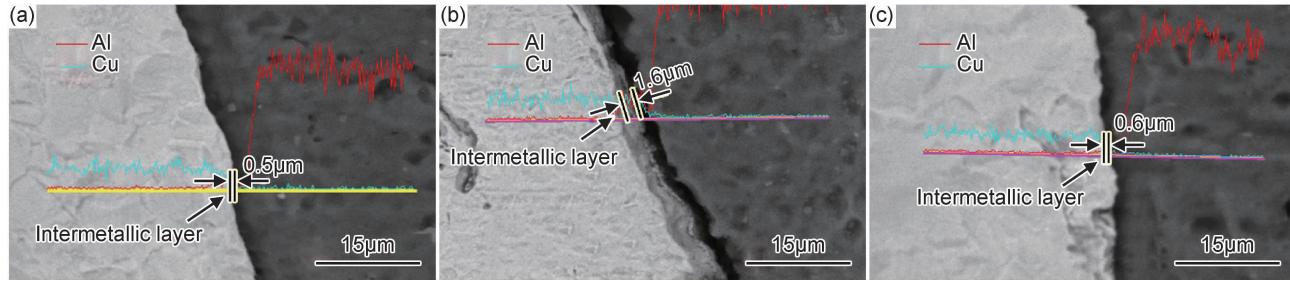


图 6 铝铜结合界面 EDS 线扫描结果

(a) SFSW-750;(b) SFSW-1180;(c) SFSW-1500

Fig. 6 EDS line scan results of aluminium-copper interface

(a) SFSW-750;(b) SFSW-1180;(c) SFSW-1500

2.3 力学性能

2.3.1 显微硬度

图 7 为 SFSW 接头横截面显微硬度分布图。铝和铜 BM 的平均显微硬度值分别为 128,93HV。在不同的转速下,接头横截面的显微硬度分布曲线呈现出近似相同的特征。由于各个区域经受了不同的热循环和塑性变形,导致接头各个区域的显微硬度呈现出差异性。与铜 BM 相比,铜侧 HAZ 和 TMAZ 显微硬度降低,且距离焊缝中心越近,硬度值越低。这主要是因为该区域的材料受到热循环的影响,晶粒发生粗化;距离焊缝中心越近,热输入量越大,粗化效应越明显。同时,铝侧 HAZ 和 TMAZ 显微硬度表现出与铜侧对应区域相同的变化规律。这是因为 2024 铝合金作为沉淀强化铝合金,其硬度主要受到析出相和晶粒尺寸的影响。HAZ 和 TMAZ 材料受热循环作用发生过时效,导致析出相和晶粒粗化,显微硬度降低^[24]。与铜、铝两侧 HAZ 和 TMAZ 相比,NZ 显微硬度略有升高,其主要原因是焊接过程中该区域的温度达到了铝合金的固溶温度,析出相发生溶解。在随后的冷却和放置过程中发生了自然时效。再者,NZ 铜、铝晶粒细化也会导致该区域硬度升高。通常,转速会对焊接温度和塑性变形产生影响,进而对晶粒尺寸、析出相和金属间化合物等微观结构产生影响。从本实验结果分析来看,当转速为 750~1500 r/min 时,转速对接头的显微硬度影响较小。当转速超过 1500 r/min 时,由于塑性

变形程度的增加,在 NZ 形成了金属间化合物,导致硬度值有突高点(图 7 方框所示点)。

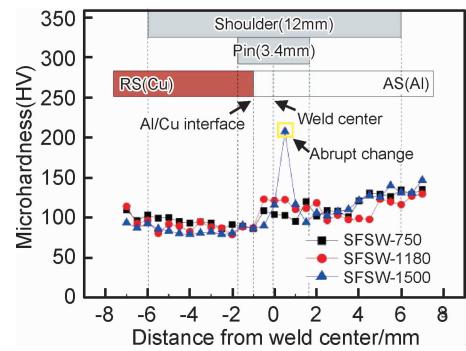


图 7 接头横截面显微硬度分布

Fig. 7 Microhardness distribution measured on cross-section of joints

2.3.2 拉伸性能及断口形貌

图 8 为不同焊接参数下 SFSW 接头的拉伸性能。由图 8 可见,抗拉强度和伸长率随转速的升高而减小。SFSW-750 接头抗拉强度为 227 MPa,达到了铜 BM 的 70.3%。随着转速的增加,接头的强度值下降,依次为铜 BM 的 58.5%,32.5%。图 9 所示为不同参数铝/铜异种接头拉伸断裂横截面宏观形貌。可观察到 SFSW-750 和 SFSW-1180 在铝铜结合界面处断裂,SFSW-1500 在 NZ 断裂。通常认为,铝/铜结合界面处的金属间化合物层(图 6),是铝/铜焊接接头的薄弱

区域,较厚的金属间化合物层会降低接头的力学性能,比如 Liu 等^[25]的研究结果表明,大量脆性的金属间化合物导致 FSW 5052Al-Cu 接头的抗拉强度仅为 127MPa。

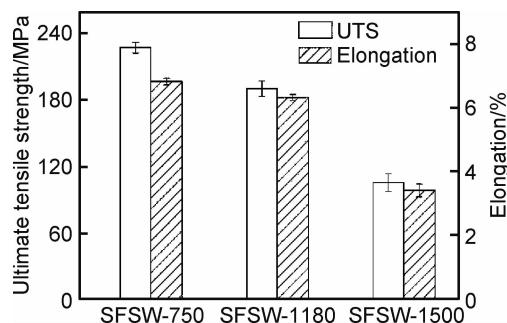


图 8 不同焊接参数下 SFSW 接头的拉伸性能

Fig. 8 Tensile properties of SFSW joints at different welding parameters

当转速增加到 1180r/min 时,金属间化合物层变厚($1.6\mu\text{m}$)(图 6(b)),导致其力学性能下降。因此,SFSW-1180 的力学性能较 SFSW-750 低。与 SFSW-1180 相比,SFSW-1500 的金属间化合物层厚度($0.6\mu\text{m}$)较小,但接头的抗拉强度较低。这是由于 NZ 被带入大量铜块,组织混乱无序(图 3),降低了接头的结合强度,易产生裂纹萌生,导致接头抗拉强度和伸长率下降。

图 10(a),(b) 分别为铜和铝的断口形貌,均呈典型的韧性断裂形貌。图 11 为不同参数铝/铜异种接头拉伸断口形貌。可以看出,SFSW-750 断裂面呈典型脆性断裂;SFSW-1180 断口可观察到少量剪切棱及较平坦的断面,这一发现与 Muthu 等^[23]的研究结果类似;SFSW-1500 断裂面呈流变花样和叠层结构,且分布着少量较浅的韧窝,为韧-脆混合型断裂。

本实验中,SFSW-750 的金属间化合物层厚度为

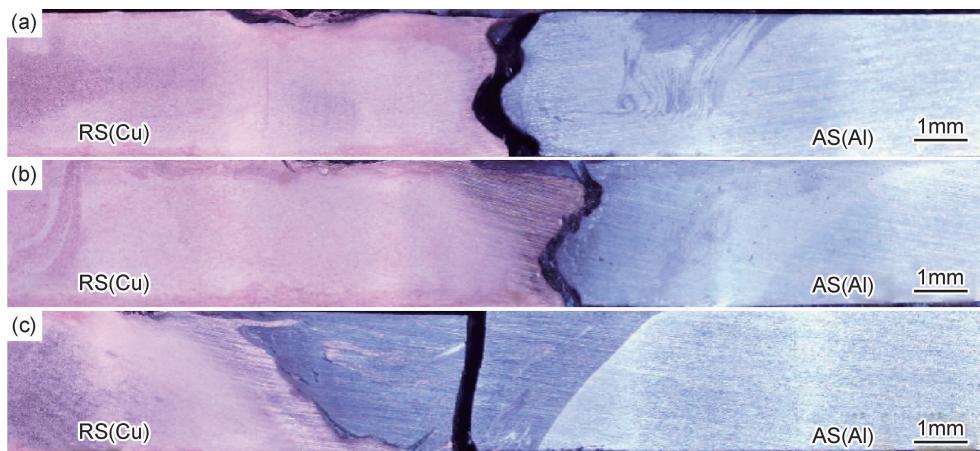


图 9 不同转速下接头拉伸断裂横截面宏观形貌

(a) SFSW-750;(b) SFSW-1180;(c) SFSW-1500

Fig. 9 Macroscopic appearances of tensile fracture cross-section of joints at different rotation speeds

(a) SFSW-750;(b) SFSW-1180;(c) SFSW-1500

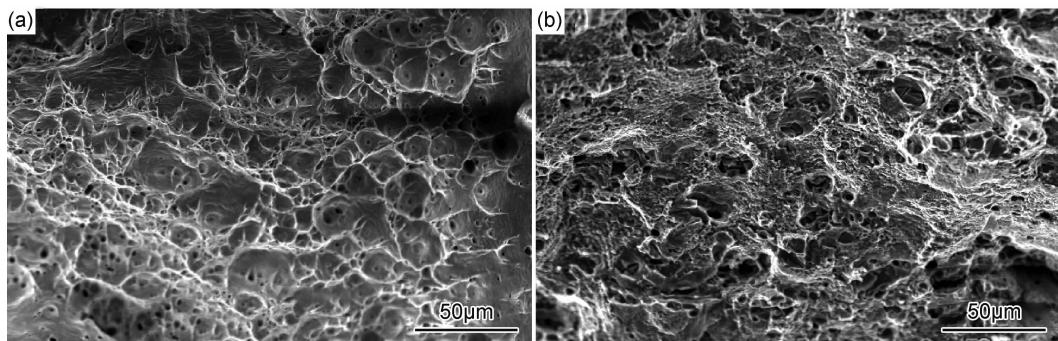


图 10 母材的断口形貌 (a)Cu;(b)Al

Fig. 10 Fracture morphologies of BM (a)Cu;(b)Al

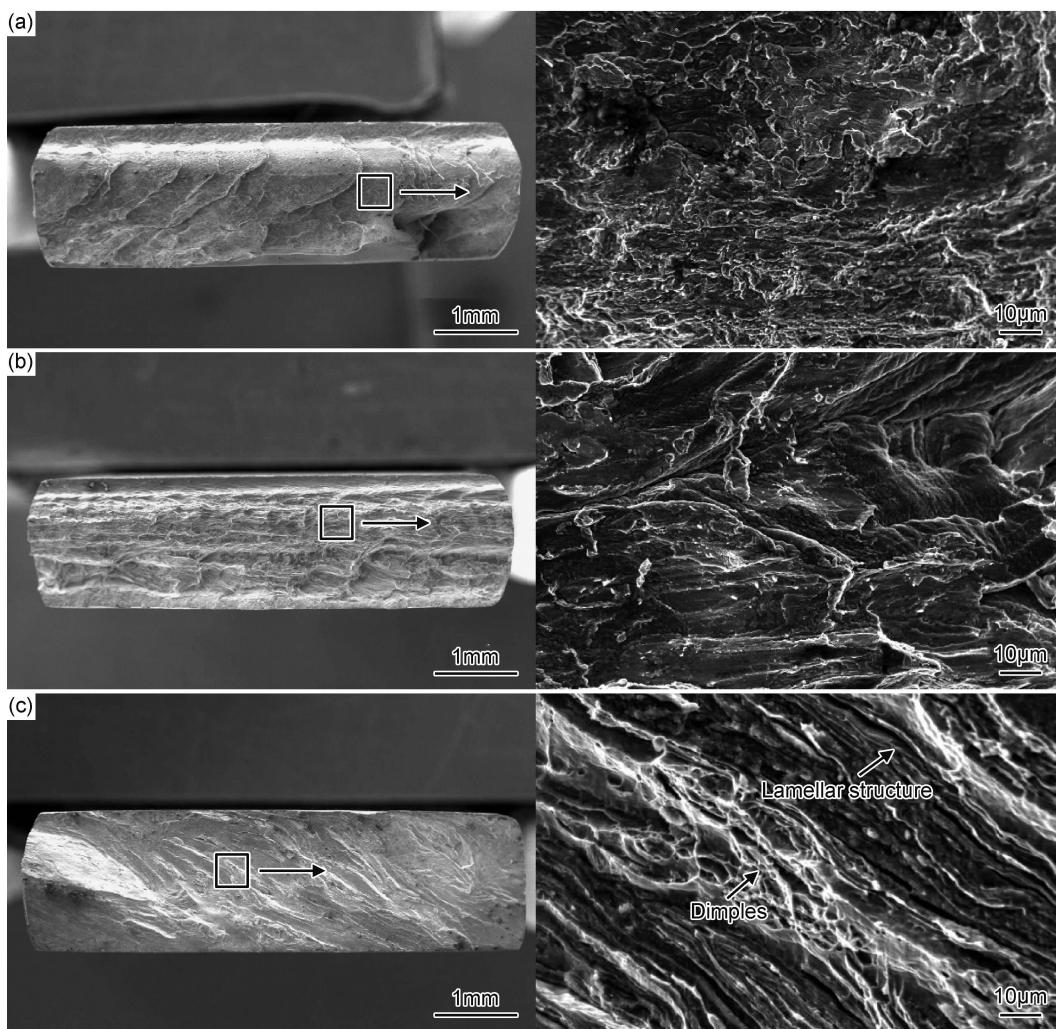


图 11 接头拉伸断口 SEM 形貌 (a)SFSW-750;(b)SFSW-1180;(c)SFSW-1500

Fig. 11 SEM morphologies of tensile fracture of joints (a)SFSW-750;(b)SFSW-1180;(c)SFSW-1500

3 结论

(1) 对 2024 铝合金和紫铜进行 SFSW, 随转速升高, 接头表面平整度提高, 大量铜被卷入 NZ, NZ 组织结构逐渐混乱。

(2) HAZ 晶粒相比 BM 无明显长大, 表明冷却介质能有效抑制晶粒的粗化。

(3) 铝铜结合界面处金属间化合物层最小厚度为 $0.5\mu\text{m}$, 表明 SFSW 能有效抑制金属间化合物的生成。

(4) 当转速为 750r/min 时焊接接头的强度最高, 达到铜母材抗拉强度的 70.3%。随转速升高, 抗拉强度和伸长率逐渐降低。

参考文献

- [1] LI Z W, JI S D, MA Y N, et al. Fracture mechanism of refill friction stir spot-welded 2024-T4 aluminum alloy [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 86:

(5/8):1925-1932.

- [2] ZHANG Q Z, GONG W B, LIU W. Microstructure and mechanical properties of dissimilar Al-Cu joints by friction stir welding[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(6):1779-1786.
- [3] XUE P, NI D R, WANG D, et al. Effect of friction stir welding parameters on the microstructure and mechanical properties of the dissimilar Al-Cu joints[J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528(13/14):4683-4689.
- [4] AL-ROUBAIY A O, NABAT S M, BATAKO A D L. Experimental and theoretical analysis of friction stir welding of Al-Cu joints [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 71(9/12):1631-1642.
- [5] 乔柯, 王快社, 王文, 等. 转速对铝铜层状复合板搅拌摩擦焊接接头组织性能的影响[J]. 航空材料学报, 2017, 37(5):35-40.
- QIAO K, WANG K S, WANG W, et al. Effect of rotation rate on microstructure and properties of friction stir welded joints of Al/Cu clad plates[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2017, 37(5):35-40.
- [6] PRONICHEV D V, GUREVICH L M, TRYKOV Y P, et al.

- Investigation of aluminum-copper bimetal-based intermetallic coating produced by contact melting method [J]. Inorganic Materials; Applied Research, 2016, 7(1):97-101.
- [7] GALVÃO I, LEAL R M, LOUREIRO A, et al. Material flow in heterogeneous friction stir welding of aluminium and copper thin sheets[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2013, 15(8):654-660.
- [8] THOMAS W M, MURCH M G, NICHOLAS E D, et al. Improvements relating to friction welding: EP0653265[P]. 1995-05-17.
- [9] MOFID M A, ABDOLLAH-ZADEH A, GHAINI F M, et al. Submerged friction-stir welding (SFSW) underwater and under liquid nitrogen: an improved method to join Al alloys to Mg alloys [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2012, 43(13): 5106-5114.
- [10] ABDOLLAH-ZADEH A, SAEID T, SAZGARI B. Microstructural and mechanical properties of friction stir welded aluminum/copper lap joints[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2008, 460(1/2):535-538.
- [11] ZHAO Y, JIANG S, YANG S, et al. Influence of cooling conditions on joint properties and microstructures of aluminum and magnesium dissimilar alloys by friction stir welding [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 83(1/4):673-679.
- [12] ZHANG J Q, SHEN Y F, YAO X, et al. Investigation on dissimilar underwater friction stir lap welding of 6061-T6 aluminum alloy to pure copper[J]. Materials & Design, 2014, 64:74-80.
- [13] HAJINEZHAD M, AZIZI A. Numerical analysis of effect of coolant on the transient temperature in underwater friction stir welding of Al6061-T6 [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 83(5/8):1241-1252.
- [14] 郝亚鑫,王文,徐瑞琦,等. 焊后热处理对 7A04 铝合金水下搅拌摩擦焊接接头组织性能的影响[J]. 材料工程, 2016, 44(6):70-75.
- HAO Y X, WANG W, XU R Q, et al. Effect of post weld heat treatment on microstructure and mechanical properties of submerged friction stir welded 7A04 aluminum alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44(6):70-75.
- [15] ZHANG H J, LIU H J, LEI Y U. Thermal modeling of underwater friction stir welding of high strength aluminum alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(4):1114-1122.
- [16] 王文,李天麒,乔柯,等. 转速对水下搅拌摩擦焊接 7A04-T6 铝合金组织与性能的影响[J]. 材料工程, 2017, 45(10):32-38.
- WANG W, LI T Q, QIAO K, et al. Effect of rotation rate on microstructure and properties of underwater friction stir welded 7A04-T6 aluminum alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2017, 45(10):32-38.
- [17] McNELLEY T R, SWAMINATHAN S, SU J Q. Recrystallization mechanisms during friction stir welding/processing of aluminum alloys[J]. Scripta Materialia, 2008, 58(5):349-354.
- [18] BHATTACHARYA T K, DAS H, JANA S S, et al. Numerical and experimental investigation of thermal history, material flow and mechanical properties of friction stir welded aluminium alloy to DHP copper dissimilar joint[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 88(1/4):1-15.
- [19] GALVÃO I, VERDERA D, GESTO D, et al. Influence of aluminium alloy type on dissimilar friction stir lap welding of aluminium to copper [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(11):1920-1928.
- [20] GALVÃO I, OLIVEIRA J C, LOUREIRO A, et al. Formation and distribution of brittle structures in friction stir welding of aluminium and copper: influence of process parameters [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2011, 16(8): 681-689.
- [21] LIU H J, SHEN J J, ZHOU L, et al. Microstructural characterisation and mechanical properties of friction stir welded joints of aluminium alloy to copper[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2013, 16(1):92-98.
- [22] AVETTAND-FENOËL M N, TAILLARD R, JI G, et al. Multiscale study of interfacial intermetallic compounds in a dissimilar Al6082-T6/Cu friction-stir weld[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2012, 43(12):4655-4666.
- [23] MUTHU M F X, JAYABALAN V. Tool travel speed effects on the microstructure of friction stir welded aluminium-copper joints [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 217: 105-113.
- [24] JONES M J, HEURTIER P, DESRAYAUD C, et al. Correlation between microstructure and microhardness in a friction stir welded 2024 aluminium alloy[J]. Scripta Materialia, 2005, 52(8):693-697.
- [25] LIU H J, SHEN J J, XIE S, et al. Weld appearance and microstructural characteristics of friction stir butt barrier welded joints of aluminium alloy to copper[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2012, 17(2):104-110.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1760201,51574192)

收稿日期:2018-04-23; **修订日期:**2019-06-09

通讯作者:王快社(1966—),男,教授,博士,研究方向为搅拌摩擦焊接、搅拌摩擦加工,联系地址:陕西省西安市碑林区雁塔路 13 号西安建筑科技大学(710055),E-mail:wangkuaishe888@126.com

(本文责编:寇凤梅)