



铝/铜异种金属双面搅拌摩擦焊接成形及接头力学性能

唐九兴¹, 吴明孝², 石磊¹, 武传松¹, 杨威², 高嵩³

(1. 山东大学 材料液固结构演变与加工教育部重点实验室, 济南 250061;

2. 国网河南省电力公司 电力科学研究院, 郑州 450052;

3. 齐鲁工业大学(山东省科学院) 机械与汽车工程学院, 济南 250353)

摘要: 对12 mm厚的1060纯铝与T2紫铜进行了双面搅拌摩擦焊接, 研究了焊接速度对焊缝成形与接头力学性能的影响。结果表明: 在搅拌头转速为600 r/min的条件下, 当焊接速度为30~50 mm/min时, 焊接速度对接头力学性能影响较小, 接头均断裂于铝母材一侧; 当焊接速度为30 mm/min时, 获得了无缺陷的焊接接头; 当焊接速度为40~50 mm/min时, 接头出现扁平状小孔洞缺陷, 此时, 由于搅入焊缝的铜与铝混合形成复合材料结构, 增强了焊缝性能, 因此, 其接头强度仍高于纯铝母材的; 当焊接速度超过60 mm/min时, 热输入降低引起材料流动不足, 在接头内形成贯穿焊缝的孔洞缺陷, 使接头承载面积减小, 抗拉强度降低。搅拌区中部受到搅拌头两次热力搅拌作用, 硬度最高。此外, 由于第一道焊缝引起工件变形, 在相同下压量的情况下, 第二道焊缝相对于第一道焊缝压力略低、热输入较小, 使得焊缝底部(即第二道焊缝)的硬度低于焊缝上部(即第一道焊缝)的, 且第二道焊缝更易出现孔洞缺陷。综合考虑焊接效率和接头性能, 50 mm/min为最优焊接速度, 此时接头性能与铝母材的相当, 抗拉强度为75.6 MPa, 伸长率为26%。

关键词: 铝/铜异种焊接; 双面搅拌摩擦焊; 焊缝成形; 力学性能; 焊接速度

文章编号: 1004-0609(2022)-09-2556-12

中图分类号: TG456.9

文献标志码: A

引文格式: 唐九兴, 吴明孝, 石磊, 等. 铝/铜异种金属双面搅拌摩擦焊接成形及接头力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(9): 2556-2567. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42658

TANG Jiu-xing, WU Ming-xiao, SHI Lei, et al. Aluminum/copper dissimilar metal double-sided friction stir welding formation and mechanical properties of joint[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(9): 2556-2567. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42658

铜及其合金因具有良好的延展性、耐腐蚀性、导热性、导电性, 广泛应用于电力电子、能源化工、国防工业等领域, 成为我国消费量巨大的重要金属之一^[1-2]。但铜属于稀缺资源, 价格昂贵^[3]。如何降低成本、减少铜及其合金的消耗量成为制造领域的热点问题之一^[4]。与铜及其合金相比, 铝材来源丰富, 价格相对低廉。同时铝还拥有优异的导热

性、导电性、塑性和可加工性能^[5]。以铝替代铜, 在满足使用性能的条件下, 可以优化产品的质量和降低产品的成本^[6-9]。但在一些特定应用场合, 铝又不能完全替代铜^[10]。因此, 以铝部分替代铜, 采用铝/铜异种焊接结构, 能充分发挥铝/铜两种材料各自的优势^[11]。当前, 铝/铜异种复合构件在电力电子、航空航天、能源工业领域的应用需求快速增

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51905309); 国网河南省电力公司科技计划(52170220009Y)

收稿日期: 2021-11-11; 修订日期: 2021-12-13

通信作者: 石磊, 教授, 博士; 电话: 0531-88395987; E-mail: lei.shi@sdu.edu.cn

长,铝/铜之间的连接已成为焊接研究的重点方向之一^[12]。

由于铝/铜异种材料在物理化学性能上存在巨大的差异,采用熔焊方法进行焊接时极易生成裂纹、气孔、夹渣、未熔合、脆硬金属间化合物等缺陷,影响接头性能。采用固相连接方法对铝/铜材料进行连接更具优势,常用的焊接方法主要有钎焊、超声波焊、真空扩散焊、爆炸焊、惯性摩擦焊、搅拌摩擦焊(Friction stir welding, FSW)等。钎焊过程中需要对钎料成分和钎焊工艺严格把控,特别是选择的钎料需要对两种母材具有良好的润湿性,同时要避免与两种母材反应生成过厚的金属间化合物^[13]。超声波焊接对焊件尺寸和形状等方面要求较高,并且只能焊薄板^[14]。真空扩散焊和爆炸焊对设备和接头形式的要求很高,应用场合受限^[15]。惯性摩擦焊只能对轴类、环状零部件进行焊接^[16]。

搅拌摩擦焊非常适合异种材料焊接,目前已成功实现了铝/铜、铝/镁、铝/钢等异种材料的焊接^[17]。然而,搅拌摩擦焊接过程中主要依靠搅拌头与工件的摩擦产热和塑性变形做功来软化材料,进行中厚板异种焊时,通常需要采用较大的搅拌头轴肩,这使得工件上部热输入较高,导致异种材料结合面处易生成较厚的金属间化合物层,影响焊缝成形和接头的力学性能。采用FSW进行中厚板焊接时,搅拌针产热较少,使得焊缝底部的热量供应不足,材料流动性差,容易出现未焊透、隧道和弱连接等缺陷。同时,中厚板的焊接需要的搅拌针更长,焊接时的前进阻力较大,使得搅拌头容易折断,影响其使用寿命^[18]。采用双面FSW则可以很好地解决中厚板单面FSW所存在的上述问题。荆洪阳等^[19]对10 mm厚的6063-T6铝合金分别进行了单面FSW、双面FSW,结果表明双面焊接头的力学性能明显优于单面焊接头。林松等^[20]进行了6 mm厚的7N01铝合金双面FSW,并分析了焊接接头的显微组织和硬度分布,发现焊核区为均匀细小的等轴晶,热力影响区和热机影响区的晶粒形状分别呈条弧状和板条状,从焊核区到母材硬度逐渐降低。刘亮等^[21]通过双面FSW方法,实现了15 mm厚的异种铝合金5052-O/6061-T6的焊接,发现随着搅拌头旋转速度的增加,接头的抗拉强度先增大后减小,伸长率比较稳定。GARG等^[22]对12.7 mm厚

的异种AA6061/AA7075铝合金进行了双面FSW,研究了搅拌头旋转方向对接头的抗拉强度、断裂行为的影响,结果表明,搅拌头旋转方向对焊缝质量有显著影响,没有隧道缺陷的接头表现出更高的抗拉强度,断裂发生在前进侧母材和热影响区的界面处。HEJAZI^[23]对4 mm厚的AA6061-T913铝合金分别进行了单面FSW、双面FSW,研究了搅拌头的针长对焊缝组织与接头性能的影响,发现当搅拌针长度为65%板厚时,双面FSW接头的抗拉强度比单面FSW接头的提高了41%。上述研究证明,采用双面FSW能够较好地调控焊接热输入和温度分布,从而获得更优异的接头性能。

在进行异种材料FSW时,采用双面焊能够降低轴肩区域的产热,进而抑制金属间化合物的增厚,提高接头性能。目前,尚无纯铝/T2紫铜中厚板的异种金属双面搅拌摩擦研究报道,本文以12 mm厚的纯铝/T2紫铜作为对象,研究了焊接速度对Al/Cu异种金属双面搅拌摩擦焊缝成形及接头力学性能的影响,为铝/铜轻量化结构焊接技术的应用提供理论基础和技术支持。

1 实验

1.1 实验材料

试验母材采用120 mm×80 mm×12 mm的1060工业纯铝和T2紫铜,其化学成分见表1和表2。焊前用砂纸对两种待焊板材的表面进行打磨,以去除氧化膜,随后使用丙酮清洗板材表面的油污和杂质。本实验选用的纯铝抗拉强度为75 MPa,伸长率为26%;T2紫铜抗拉强度为245 MPa,伸长率为8%。

表1 1060工业纯铝的化学成分

Table 1 Chemical compositions of 1060 commercial purity aluminium (mass fraction, %)

Al	Mn	Si	Mg	Zn	Ti
Bal.	0.03	0.25	0.03	0.06	0.03

表2 T2紫铜的化学成分

Table 2 Chemical compositions of T2 copper (mass fraction, %)

Cu+Ag	Bi	Zn	S	As	Fe
Bal.	0.001	0.2	0.002	0.002	0.005

1.2 实验方法

采用双面FSW进行焊接。具体步骤如下：先焊接正面，待工件冷却下来后，使用角磨机对第一道焊缝进行打磨，以保证焊件表面平整；之后将工件翻转180°，在第一道焊缝的背部进行第二道焊接。焊接时，T2紫铜置于前进侧且搅拌针偏铝侧2.7 mm。试验采FSW-3LM-3012龙门式搅拌摩擦焊设备，焊接过程中搅拌头倾角为2.5°，搅拌头旋转速度固定为600 r/min。焊接方向与板材轧制方向平行，双面FSW焊接示意图如图1(a)所示。试验使用不带螺纹的光面柱状搅拌头，材料为H13工具钢，轴肩直径为20 mm，搅拌针直径为6 mm、长度为5.8 mm，下压量为0.2 mm，搅拌头几何形状及参

数如图1(b)所示。

焊接完成后，根据GB/T 228.1—2010标准，使用线切割沿垂直焊接方向切取拉伸试样，试样尺寸如图2所示。每组焊接参数下加工3个拉伸试样，使用砂纸打磨拉伸试样边缘以去除线切割痕迹，在万能试验机上进行拉伸性能测试，拉伸加载速率为1 mm/min，并使用扫描电镜观察断口形貌和接头部分区域的背散射图像。利用显微硬度计对焊接接头各区域的硬度值进行测量，载荷为2.942 N，保压时间为10 s。显微硬度测试位置如图3所示，其中上部、中部和底部线沿试样横截面打点，各点间距为0.25 mm，分别距离第一道焊缝上表面3 mm、6 mm、9 mm。

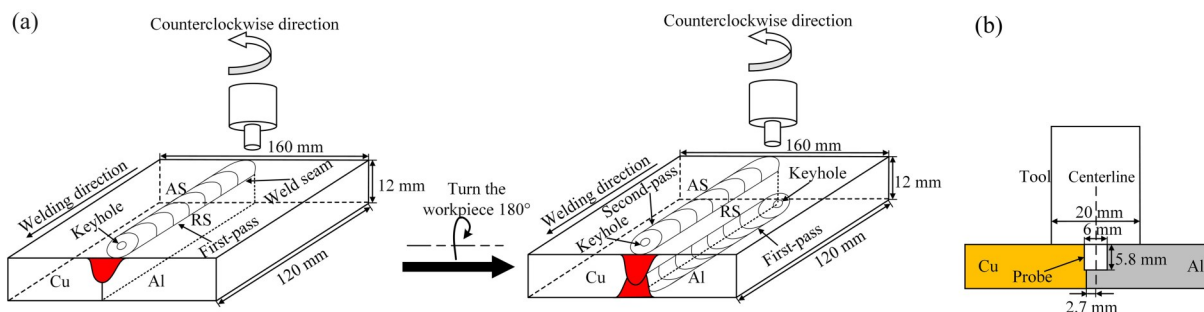


图1 双面搅拌摩擦焊接示意图和搅拌头偏置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of double-sided friction stir welding(a) and tool offset(b)

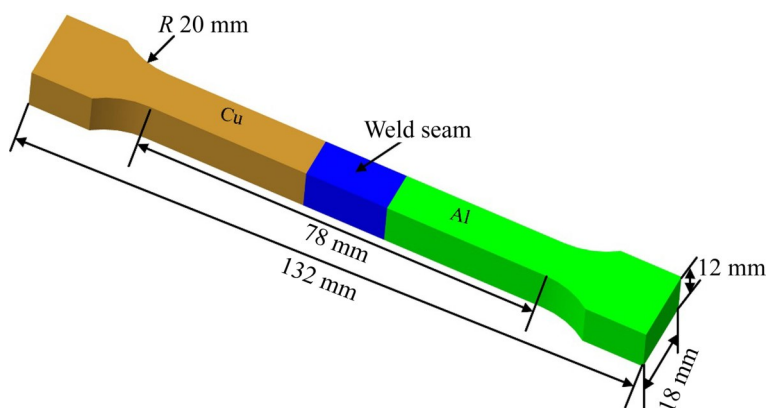


图2 铝/铜拉伸试样尺寸示意图

Fig. 2 Schematic diagram showing dimension details of Al/Cu tensile sample

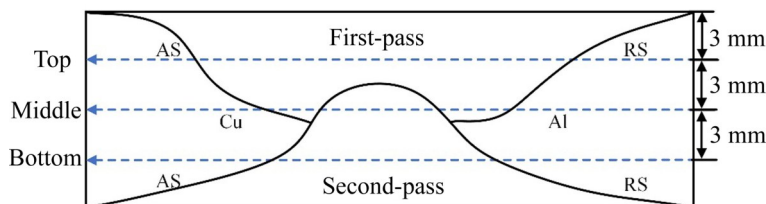


图3 接头横断面微观硬度测试位置示意图

Fig. 3 Schematic diagram depicting micro-hardness measured positions on cross-section of joints

2 结果与讨论

2.1 焊缝成形

图 4 所示为不同焊接速度条件下 Al/Cu 异种金属双面 FSW 焊缝表面形貌。当焊接速度为 30~50 mm/min 时, 焊接热输入较为合适, 焊缝表面较为光滑、成形较好。当焊接速度提高至 60 mm/min 时, 热输入降低, 焊缝表面粗糙, 出现了较大的毛刺。随着焊接速度进一步提高至 70 mm/min, 热输入不足, 使得金属的流动性变差, 材料流动与混合均不充分, 此时第一道焊缝和第二道焊缝表面均出现了表面沟槽缺陷。综上所述, 过高的焊接速度直接导致焊接热输入过低, 材料流动性不好, 使得焊缝表面出现沟槽等缺陷, 严重影响焊缝美观, 并恶化接头性能; 合理的热输入可以获得表面光滑、平整的 Al/Cu 异种金属焊缝。

图 5 所示为不同焊接速度条件下 Al/Cu 异种金

属双面 FSW 焊缝横断面的宏观形貌。图 5 中左边为铜基体, 右边为铝基体, 接头的上部为第一道焊缝, 底部为第二道焊缝。当焊接速度为 30 mm/min 时, 热输入较大、温度高, 铜金属得以软化, 使得搅拌头能够将大块铜从铜母材上撕扯下来, 并搅入焊缝。同时, 由于铜的熔点较高, 焊核区铜金属的流动性较差, 使得搅入的铜以较大尺寸的形态出现。在此焊接参数下, 焊接热输入较大, 材料流动性相对较强, 接头横截面未发现孔洞类的体积缺陷, 成形较好。随着焊接速度提高, 焊接热输入变小, 材料内部流动性变差, 焊缝内部出现了孔洞、沟槽等体积缺陷。当焊接速度为 40 mm/min 时, 焊缝内部的铜颗粒尺寸较小, 第一道焊缝成形良好, 铝基体中分布着条带状的铜, 但在第二道焊缝的底部出现了孔洞缺陷。当焊接速度进一步提高至 60 mm/min 及以上时, 接头内部出现体积更大且贯穿焊缝的隧道型孔洞缺陷。从图 5 可以看出, 在相同的工艺参数条件下, 第二道焊缝比第一道焊缝更易

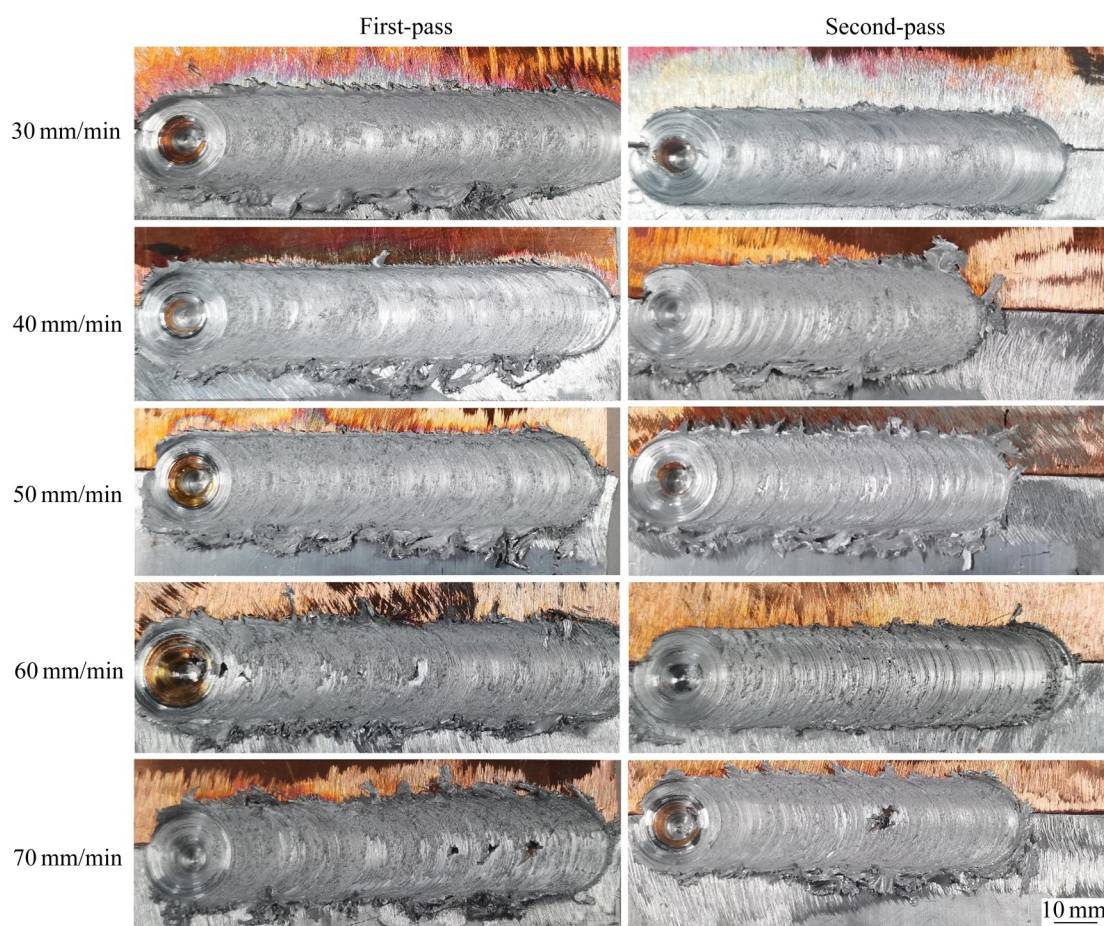


图 4 不同焊接速度条件下的焊缝表面成形

Fig. 4 Surface appearances of Al/Cu welds at different welding speeds

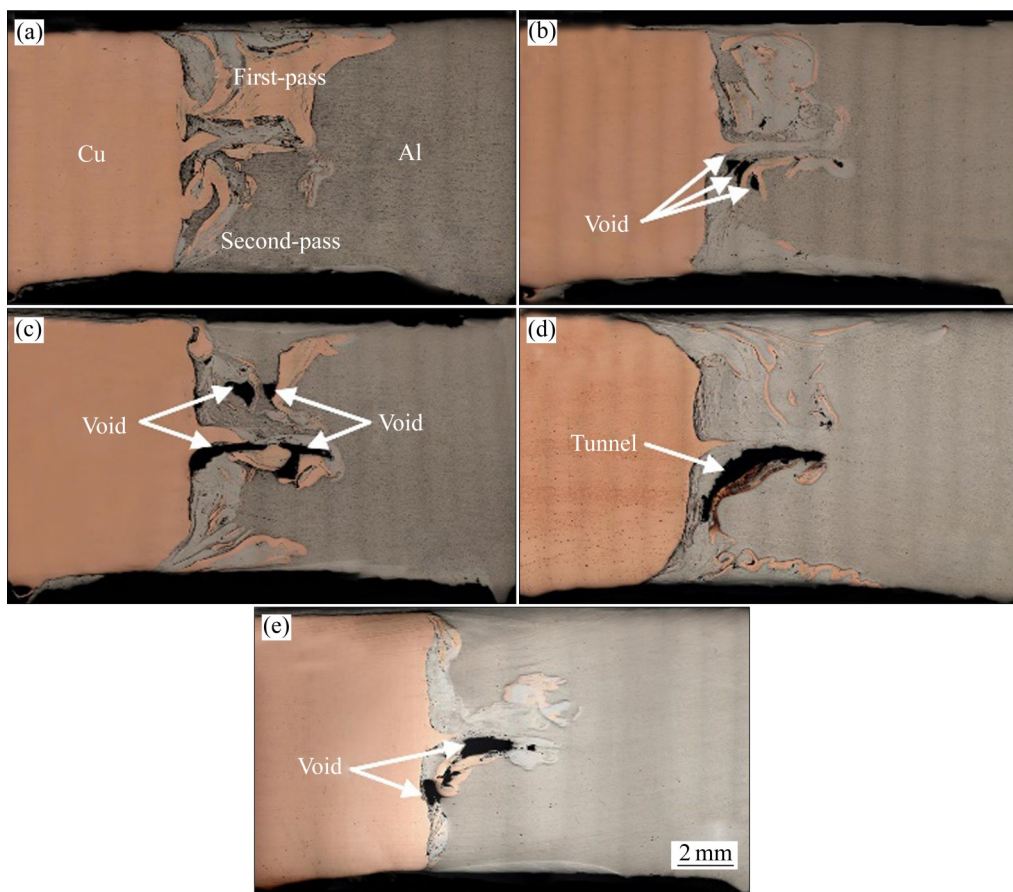


图5 不同焊接速度条件下 Al/Cu 双面 FSW 焊缝横断面宏观形貌

Fig. 5 Macroscopic appearances of Al/Cu welds along transverse cross-section at different welding speeds: (a) $v=30$ mm/min; (b) $v=40$ mm/min; (c) $v=50$ mm/min; (d) $v=60$ mm/min; (e) $v=70$ mm/min

出现孔洞、隧道型体积缺陷，这主要是由于第一道焊缝引起了焊接变形，使得进行第二道焊接时搅拌头的下压力略有降低，因此，更容易出现孔洞缺陷。

2.2 焊缝微观组织

图6所示为焊接速度为50 mm/min时接头横截面的背散射扫描像。由图6可以看出，在轴肩和搅拌针的热-力作用下，铜颗粒和铜层片从铜基体脱落并被搅入焊核区，与铝金属混合。在焊接过程中，搅入焊核区的铜金属受到焊接热力耦合作用，发生撕裂、塑性变形、破碎的程度存在较大差异，在焊缝内部的形态存在明显区别。通过观察焊缝的背散射扫描形貌，发现搅入焊缝的铜主要以铜颗粒和铝/铜层状复合结构两种典型形态存在。

在铝/铜异种材料搅拌摩擦焊接过程中，焊核区材料的热力变形行为对接头铜颗粒的形态具有重

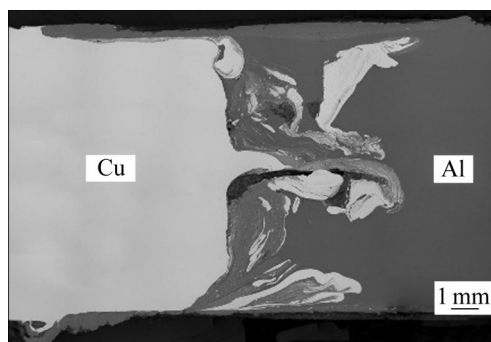


图6 转速为600 r/min、焊接速度为50 mm/min时焊接接头背散射扫描像

Fig. 6 BES images of weld joint at rotation speed of 600 r/min and welding speed of 50 mm/min

要影响。如图7所示，当被搅入焊核区的铜以大小不一的铜颗粒存在时，有四种典型的分布形态：块状、直条状、弯曲状和弥散状(见图7中标注编号)。焊接时，铜基体受到搅拌头的剪切作用，发生撕裂并被卷入焊缝。当卷入的铜靠近焊缝中心，具有较

高的温度和塑性流动性时, 经过充分的破碎和塑性变形, 会在焊缝中以弥散态存在。相反, 当从基体中剥落的铜没有被完全破碎, 就会呈现出块状、直条状和弯曲状等形态。

图8所示为接头焊核区铝/铜层状复合结构的分布形态, 主要有三种分布形态: 弯曲状、直条状以及波浪状。这些层状复合结构都是由铝/铜相间的叠层组成。在轴肩的摩擦热和搅拌针的机械搅拌作用下, 材料发生剪切塑性变形, 使得铝和铜发生了

剧烈的混合, 一些铜金属经过强烈的塑性变形, 同时与铝层发生流变与混合, 彼此穿插, 从而形成了不同形态的铝/铜层状复合结构。

图9所示为铝/铜接头叠层结构的线扫描结果, 根据图9(b)中线扫描结果可以得知, 在绿色方框处, 下层金属铝含量较高而几乎没有铜, 上层金属铜含量偏高而几乎没有铝, 而在铝/铜结合界面处则发生了两种元素的相互扩散, 且发生扩散的距离较短, 不超过 $2\ \mu\text{m}$ 。这说明在焊接过程中铝/铜混

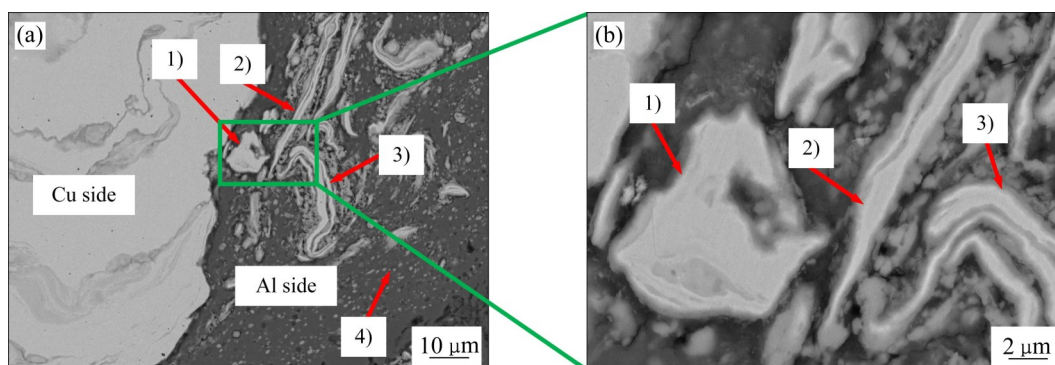


图7 接头焊核区铜金属颗粒的分布形态

Fig. 7 Distribution appearances of copper particles in nugget area of welded joints: (a) Low magnification morphology; (b) High magnification morphology

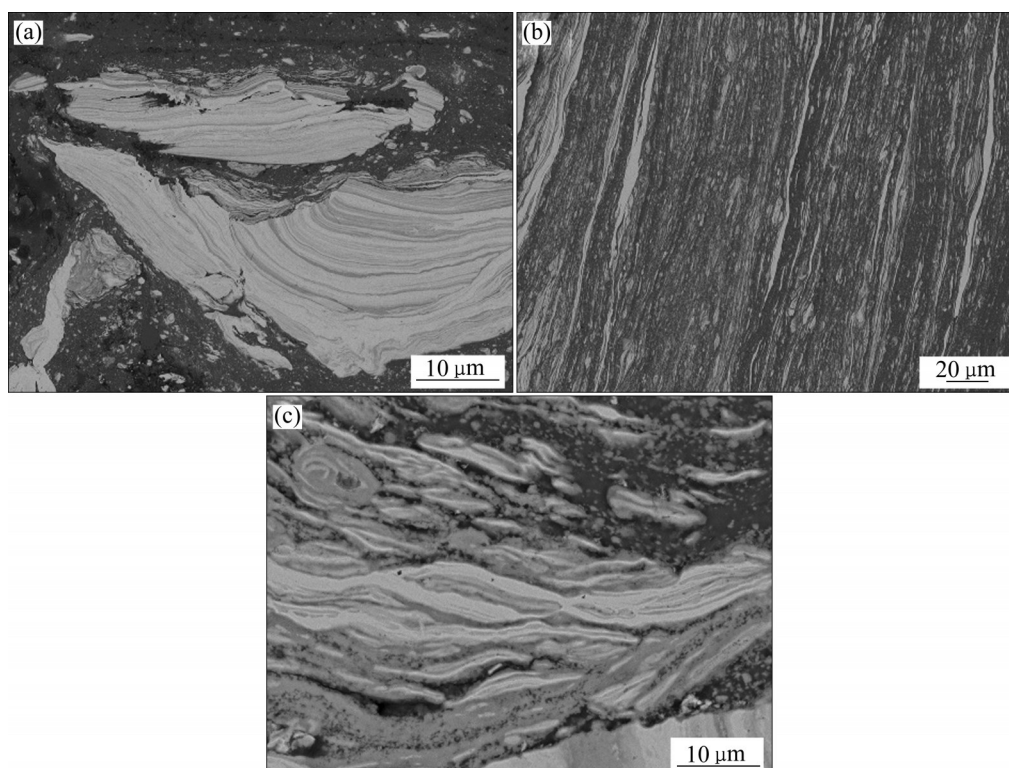


图8 接头焊核区不同形态的铝/铜层状复合结构典型形貌

Fig. 8 Typical morphologies of Al/Cu laminar composite structure with different forms in nugget area of joint: (a) Curved shape; (b) Straight strip shape; (c) Wave shape

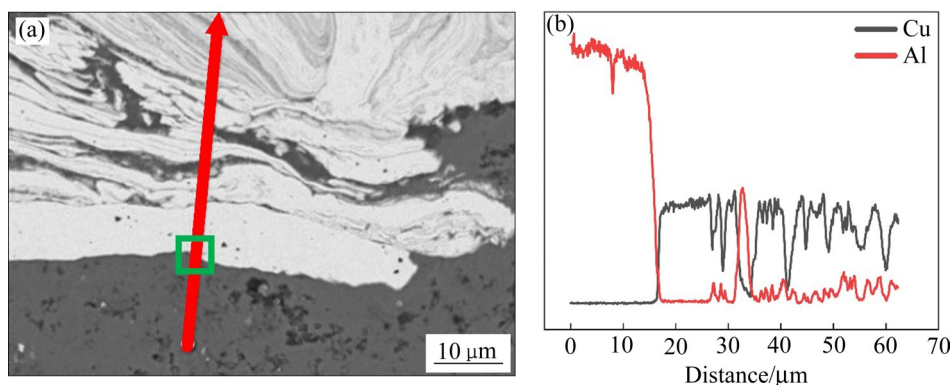


图9 焊接接头铜叠层线扫描分析

Fig. 9 Line scanning analysis of copper lamination in welded joint: (a) Scan position; (b) Scan results

合界面处形成了冶金结合，生成了金属间化合物。然而，元素的扩散仅仅发生在铝/铜两种异质材料的界面处，被搅拌头搅进焊缝中的铜层内部物相组成并未发生改变。

2.3 接头力学性能

2.3.1 接头显微硬度

图10所示为焊接速度为50 mm/min和70 mm/min条件下焊缝不同位置的显微硬度曲线。由图10可以看出，前进侧铜母材的平均显微硬度约为98.2 HV，远高于后退侧铝母材的平均显微硬度(25.2 HV)。在-10 mm和-5 mm之间的区域为热影响区，此处受到焊接热循环的作用，晶粒发生粗化，表现出一定程度的软化，其硬度值低于铜母材。铜侧热机影响区位于-5 mm和-3 mm之间，该区受到搅拌头的机械力和焊接热循环的双重作用，发生塑性变形和部分动态再结晶，其硬度值略高于热影响区。纯铝侧的热影响区和热机影响区硬度差距不大、难以区分，其硬度值几乎与母材相当。由于纯铝散热快，焊接热输入并没有引起铝侧热机影响区和热影响区的晶粒发生显著长大。根据Hall-Petch公式可知材料的强度与晶粒平均尺寸呈反比关系^[24]，由于纯铝热影响区、热机影响区和母材的晶粒尺寸基本相同，因此，这三个区域硬度值和材料强度也基本保持一致。

在搅拌区，硬度分布极不均匀，存在较大的波动。从图10中可以看出，搅拌区硬度的大小关系为中部(Middle)硬度 > 上部(Top)硬度 > 底部(Bottom)硬度。两组焊接参数下的焊缝中部的硬度

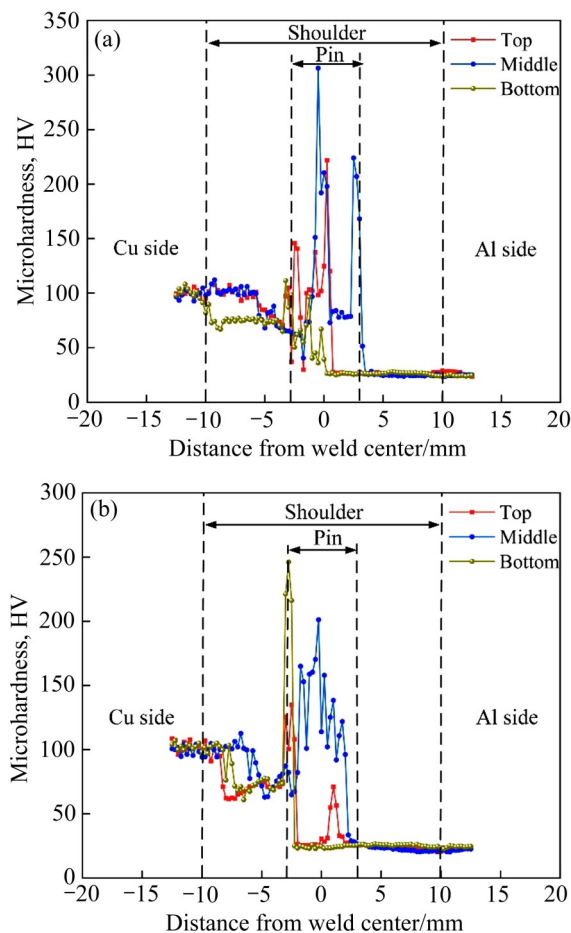


图10 铝/铜FSW焊接接头显微硬度曲线

Fig. 10 Microhardness curves of Al/Cu FSW welded joint: (a) $v=50$ mm/min; (b) $v=70$ mm/min

超过了铜母材硬度，分析认为有以下三种原因：

1) FSW过程中，焊核区发生剧烈的塑性变形和完全动态再结晶，形成了大量细小的等轴晶粒，细晶强化使该区的硬度增大；2) 铝-铜异质金属发生冶金反应，生成了脆硬的金属间化合物，例如AlCu、

Al_2Cu 、 Al_4Cu_9 ^[25-26]等, 这些金属间化合物的存在使得某些位置的硬度值陡增; 3) 中部搅拌区经历了两次搅拌摩擦焊接作用, 纯铝与纯铜混合更加剧烈, 进一步促进金属间化合物的生成, 使得焊缝搅拌区中部的硬度提高。上述因素的综合作用使得搅拌区中部的硬度高于上部和底部。另外, 由于第一道焊缝引起工件变形, 因此在相同下压量的条件下, 第二道焊缝的搅拌头下压力和热输入比第一道焊缝条件下的略低, 导致第二道焊缝更易出现孔洞缺陷(见图 5), 同时也抑制了金属间化合物的形成与增厚, 使得焊缝底部(即第二道焊缝)的硬度略低于焊缝上部(即第一道焊缝)。

2.3.2 接头拉伸性能

图 11 所示为不同焊接速度条件下接头的抗拉强度和伸长率。由图 11 可以看出, 接头的抗拉强度随焊接速度的增加, 呈现先略微增高而后降低的趋势。当焊接速度较低时, 热输入大, 材料软化充分, 流动性好, 接头处材料混合充分, 焊缝成形较好, 无孔洞缺陷, 因此接头抗拉强度较高, 达到铝合金母材的强度。随着焊接速度的增加和热输入的降低, 材料的流动性变差, 接头内部出现孔洞缺陷, 降低了接头的有效承载面积, 但接头强度仍达到了铝合金母材的强度。这主要是由于异种焊接时铜金属进入焊缝与铝混合, 形成铝铜复合材料结构, 增强了接头性能, 使得接头强度高于铝母材。从研究结果中可以看出, 在焊接速度不超过 50 mm/min 条件下, 接头的抗拉强度均达到纯铝的抗拉强度, 接头断裂于铝侧母材(见图 12)。在实际生产中, 为提高生产效益、节约成本, 一般选用较高

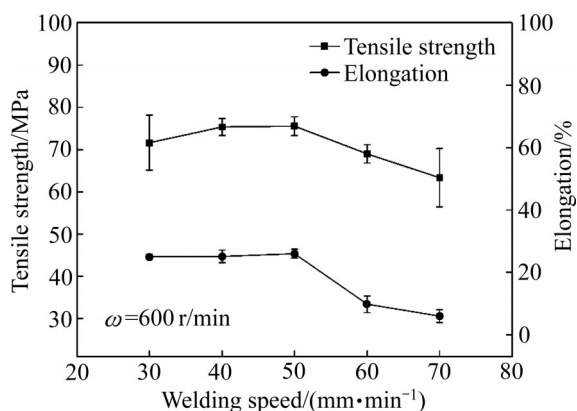


图 11 不同焊接速度下接头的拉伸性能

Fig. 11 Tensile properties of welded joint at different welding speeds

的焊接速度。因此, 在转速(ω)为 600 r/min 条件下, 焊接速度为 50 mm/min 是最优焊接速度, 此时接头拉伸强度为 75.6 MPa, 伸长率为 26%, 均与纯铝母材相当。

2.3.3 断口形貌分析

图 12 所示为不同焊接速度条件下铝/铜异种接头的拉伸断裂位置(见红色箭头)。当焊接速度为 30~50 mm/min 时, 拉伸试样断裂在 Al 侧的母材区。此时, 拉伸断口位置发生了明显的颈缩现象, 属于典型的韧性断裂。而焊接速度为 60 mm/min 与 70 mm/min 时, 拉伸试样断裂在焊缝搅拌区, 断口基本呈锯齿状且无明显颈缩现象。一般来说, 铝合金搅拌摩擦焊过程中, 热影响区析出相发生溶解或者长大, 同时发生晶粒粗化, 接头软化, 使得接头倾向断裂于热影响区^[27-29]。但纯铝和纯铜基本不存在第二相强化和固溶强化, 其强化方式为加工硬化。在本文研究的工艺参数下, 当焊接速度较低时(30 mm/min), 焊接热输入较高, 成形较好, 接头强度高, 因此接头断裂于铝合金一侧。随着焊接速度的提高, 热输入降低, 材料软化不足, 接头出现孔洞缺陷, 但在焊接速度为 40 mm/min 和 50 mm/min 时, 孔洞主要呈现扁平状。此时, 扁平状的孔洞缺陷虽然对接头强度有一定影响, 但是搅拌区的铜颗粒增强了接头的性能, 使得接头强度仍高于纯铝母材。而当焊接速度进一步升高至 60 mm/min 或 70 mm/min, 出现了贯穿焊缝厚度方向的孔洞缺陷, 使得接头的承载能力大幅降低, 最终接头断裂于搅拌区。

图 13 所示为焊接速度为 60 mm/min 和 70 mm/min 条件下的 Al/Cu 接头断口 SEM 像及其图中区域放大图。从图 13 中可以看出, 两组焊接参数下的



图 12 不同焊接速度条件下接头的拉伸断裂位置

Fig. 12 Fracture position of welded joints at different welding speeds

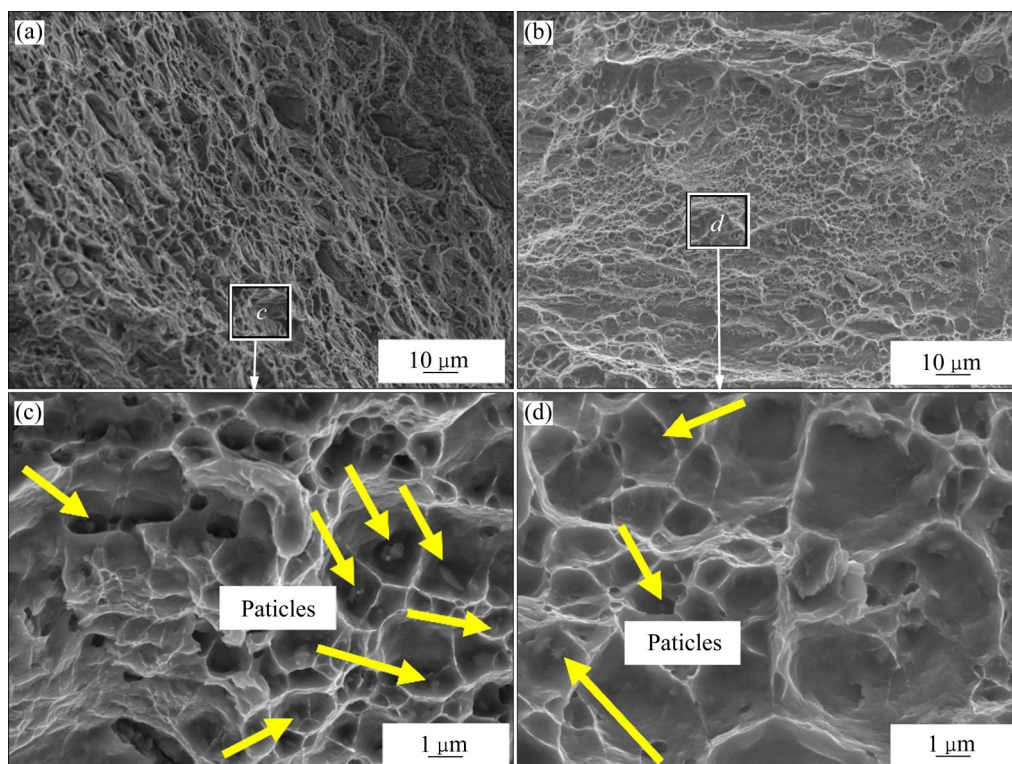


图13 铝/铜接头拉伸断口形貌及其图中区域放大图

Fig. 13 Tensile fracture morphologies of Al/Cu welded joint((a), (b)) and high magnification of regions in Figures ((c), (d)): (a), (c) 60 mm/min; (b), (d) 70 mm/min

断口形貌均表现出韧窝和撕裂棱特征，局部存在解理面，所以两组焊接参数下的拉伸断口断裂方式为韧-脆混合型断裂，与30~50 mm/min条件下的韧性断裂方式相比，接头的塑性有所降低。

3 结论

1) 采用双面搅拌摩擦焊实现了12 mm厚的1060纯铝与T2紫铜连接，在焊接速度为30 mm/min条件下，接头成形良好，其最大抗拉强度达到1060纯铝母材强度。随着焊接速度提高至50 mm/min，接头出现孔洞缺陷，但接头强度仍达到纯铝母材强度。综合考虑焊接效率和接头性能，50 mm/min为最佳焊接速度，此时接头抗拉强度为75.6 MPa，伸长率为26%。

2) 在搅拌头的搅拌和摩擦生热导致的焊接热力耦合作用下，铜颗粒和铜层被搅入焊缝形成复合材料结构，增强了焊缝的性能，使得在较高焊接速度条件下(如40~50 mm/min)即使接头出现扁平状小孔洞缺陷，其强度依然高于纯铝母材，接头断裂于纯

铝母材。但过低的热输入使得材料流动不充分，接头出现贯穿焊缝的孔洞缺陷，致使接头性能大幅降低。

3) 双面焊接时，焊缝中部搅拌区经历了两次搅拌头的热力作用，铝与铜混合更加剧烈，生成更多金属间化合物，使中部搅拌区的硬度高于其他区域。此外，由于焊接变形的影响，在相同的下压力条件下，进行第二道焊接时搅拌头的下压力低于第一道，使得第二道焊缝更易出现孔洞缺陷，同时较低的下压力使得热输入较低，抑制了金属间化合物形成与生长，使得焊缝底部(即第二道焊缝)的硬度低于焊缝上部(即第一道焊缝)的。

REFERENCES

- [1] 姜业欣, 娄花芬, 解浩峰, 等. 先进铜合金材料发展现状与展望[J]. 中国工程科学, 2020, 22(5): 84-92.
JIANG Ye-xin, LOU Hua-fen, XIE Hao-feng, et al. Development status and prospects of advanced copper alloy[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(5): 84-92.
- [2] 贺地求, 徐少华, 彭建红, 等. 铜与不锈钢搅拌摩擦焊搭

- 接接头的显微组织[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(9): 2608–2613.
- HE Di-qiu, XU Shao-hua, PENG Jian-hong, et al. Microstructure of friction stir welding lap joint between pure copper and stainless steel[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(9): 2608–2613.
- [3] 黄伯云. 我国有色金属材料现状及发展战略[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(S1): 122–127.
- HUANG Bai-yun. Status and developing strategy for China's nonferrous metal materials industry[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(S1): 122–127.
- [4] 于润润, 赵洪运, 蒋智华, 等. 铝/黄铜异种金属搅拌摩擦焊接接头显微组织与力学性能[J]. 机械工程学报, 2019, 55(6): 39–45.
- YU Ming-run, ZHAO Hong-yun, JIANG Zhi-hua, et al. Research on microstructure and mechanical properties of friction stir lap welded aluminum/brass dissimilar joint[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(6): 39–45.
- [5] 余欣未, 蒋显全, 谭小东, 等. 中国铝产业的发展现状及展望[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(4): 709–718.
- SHE Xin-wei, JIANG Xian-quan, TAN Xiao-dong, et al. Status and prospect for aluminum industrial development in China[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(4): 709–718.
- [6] 周相龙, 石玢, 朱明, 等. 铝/铜异种金属熔钎焊接头微观组织与力学性能[J]. 焊接学报, 2018, 39(5): 59–62, 131.
- ZHOU Xiang-long, SHI Yu, ZHU Ming, et al. Microstructure and mechanical properties of Al/Cu dissimilar metals welding-brazing joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(5): 59–62, 131.
- [7] SAHU P K, PAL S, PAL S K, et al. Influence of plate position, tool offset and tool rotational speed on mechanical properties and microstructures of dissimilar Al/Cu friction stir welding joints[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 235: 55–67.
- [8] ZHOU L, LUO L Y, TAN C W, et al. Effect of welding speed on microstructural evolution and mechanical properties of laser welded-brazed Al/brass dissimilar joints[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 98: 234–246.
- [9] 王盈辉, 王快社, 王文, 等. 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[J]. 材料工程, 2019, 47(11): 155–162.
- WANG Ying-hui, WANG Kuai-she, WANG Wen, et al. Effect of rotation speed on microstructure and properties of dissimilar submerged friction stir welding joints of aluminium and pure copper[J]. Journal of Materials Engineering, 2019, 47(11): 155–162.
- [10] 周利, 李志勇, 赵洪运, 等. 铝/黄铜异种金属TIG熔钎焊接头显微组织与力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(9): 2389–2395.
- ZHOU Li, LI Zhi-yong, ZHAO Hong-yun, et al. Microstructure and mechanical properties of Al/brass dissimilar metals TIG welding-brazing joint[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(9): 2389–2395.
- [11] 李志勇, 周利, 何至正, 等. 激光功率对铝/黄铜熔钎焊接头组织和性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(3): 669–681.
- LI Zhi-yong, ZHOU Li, HE Zhi-zheng, et al. Influence of laser power on microstructure and mechanical properties of Al/brass welding-brazing joints[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(3): 669–681.
- [12] FU B L, QIN G L, LI F, et al. Friction stir welding process of dissimilar metals of 6061-T6 aluminum alloy to AZ31B magnesium alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 218: 38–47.
- [13] 石玢, 周相龙, 朱明, 等. 铝/铜异种金属脉冲旁路耦合电弧MIG熔钎焊接头的组织与力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(9): 1816–1822.
- SHI Yu, ZHOU Xiang-long, ZHU Ming, et al. Microstructure and mechanical properties of Al/Cu dissimilar metals pulsed DE-MIG welding-brazing joint[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(9): 1816–1822.
- [14] 谷晓燕, 孟政宇, 刘婧, 等. 焊接能量对Mg/Ti超声波焊接接头微观组织与力学性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(6): 2139–2146.
- GU Xiao-yan, MENG Zheng-yu, LIU Jing, et al. Effect of welding energy on microstructure and mechanical properties of Mg/Ti Joints welded by ultrasonic welding[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(6): 2139–2146.
- [15] 柯黎明, 刘鸽平, 邢丽, 等. 铝合金LF₆与工业纯铜T1的搅拌摩擦焊工艺[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(9): 1534–1538.
- KE Li-ming, LIU Ge-ping, XING Li, et al. Friction stir welding process of aluminum alloy LF₆ with copper T1[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(9): 1534–1538.
- [16] 郁炎, 张建欣, 李士凯. 国内外异种材料搅拌摩擦焊的研究现状及发展趋势[J]. 兵器材料科学与工程, 2013, 36(6): 108–113.
- YU Yan, ZHANG Jian-xin, LI Shi-kai. Recent development of friction stir welding for dissimilar materials at home and

- abroad[J]. *Ordance Material Science and Engineering*, 2013, 36(6): 108–113.
- [17] 栾国红, 郭德伦. 搅拌摩擦焊技术在中国的发展和推广应用[J]. *航空制造技术*, 2014, 57(17): 70–75.
- LUAN Guo-hong, GUO De-lun. The development, promotion and application of friction stir welding technology in China[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2014, 57(17): 70–75.
- [18] 李 博, 沈以赴, 胡伟叶. 伸缩式搅拌头厚铝板搅拌摩擦焊缺陷及其补焊工艺[J]. *中国有色金属学报*, 2012, 22(1): 62–71.
- LI Bo, SHEN Yi-fu, HU Wei-ye. Friction-stir welded defects and repairing weld process of thick aluminum plates with telescopic stir-pin[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2012, 22(1): 62–71.
- [19] 荆洪阳, 丰 琪, 徐连勇, 等. 6063-T6 铝合金搅拌摩擦焊组织与力学性能研究[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(8): 13–19.
- JING Hong-yang, FENG Qi, XU Lian-yong, et al. Microstructure and mechanical properties of friction stir welds on 6063-T6 aluminum alloy[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(8): 13–19.
- [20] 林 松, 贺晓龙. 7N01 铝合金双面搅拌摩擦焊接头的组织与性能[J]. *机械工程材料*, 2020, 44(9): 82–86, 102.
- LIN Song, HE Xiao-long. Microstructure and properties of double-sided friction stir welded joint of 7N01 aluminum alloy[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2020, 44(9): 82–86, 102.
- [21] 刘 亮, 赵 丽, 王彦辉, 等. 旋转速度对异种厚板铝合金双面搅拌摩擦焊接头力学性能的影响[J]. *热加工工艺*, 2016, 45(15): 41–44, 48.
- LIU Liang, ZHAO Li, WANG Yan-hui, et al. Effect of rotation speed on mechanical properties of double-sided friction stir welding joints for dissimilar aluminum alloy plate [J]. *Hot Working Technology*, 2016, 45(15): 41–44, 48.
- [22] GARG A, RATURI M, GARG A, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of double-sided friction stir welding between AA6061-T6 and AA7075-T651[J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2020, 31: 431–438.
- [23] HEJAZI I, MIRSALEHI S E. Effect of pin penetration depth on double-sided friction stir welded joints of AA6061-T913 alloy[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2016, 26(3): 676–683.
- [24] 王建峰, 孙清洁, 马江坤, 等. 超声振动辅助E40钢水下湿法焊接组织与性能[J]. *焊接学报*, 2018, 39(4): 1–5, 129.
- WANG Jian-feng, SUN Qing-jie, MA Jiang-kun, et al. Microstructure and mechanical properties of underwater wet welded joint of E40 ship plate steel subjected to ultrasonic vibration[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2018, 39(4): 1–5, 129.
- [25] XUE P, XIAO B L, MA Z Y. Effect of interfacial microstructure evolution on mechanical properties and fracture behavior of friction stir-welded Al-Cu joints[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2015, 46(7): 3091–3103.
- [26] TAN C W, JIANG Z G, LI L Q, et al. Microstructural evolution and mechanical properties of dissimilar Al-Cu joints produced by friction stir welding[J]. *Materials & Design*, 2013, 51: 466–473.
- [27] 曾祥浩, 倪丁瑞, 薛 鹏, 等. 铝合金搅拌摩擦焊接接头的组织与性能[J]. *中国有色金属学报*, 2019, 29(8): 1654–1659.
- ZENG Xiang-hao, NI Ding-rui, XUE Peng, et al. Microstructure and mechanical property of friction stir welded Pb alloy joints[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2019, 29(8): 1654–1659.
- [28] SHANAVAS S, DHAS J E R. Parametric optimization of friction stir welding parameters of marine grade aluminium alloy using response surface methodology[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2017, 27(11): 2334–2344.
- [29] XUE P, XIAO B L, ZHANG Q, et al. Achieving friction stir welded pure copper joints with nearly equal strength to the parent metal via additional rapid cooling[J]. *Scripta Materialia*, 2011, 64(11): 1051–1054.

Aluminum/copper dissimilar metal double-sided friction stir welding formation and mechanical properties of joint

TANG Jiu-xing¹, WU Ming-xiao², SHI Lei¹, WU Chuan-song¹, YANG Wei², GAO Song³

(1. Key Laboratory for Liquid-Solid Structural Evolution and Processing of Materials (MOE),

Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Electric Power Research Institute of State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China;

3. School of Mechanical & Automotive Engineering, Qilu University of Technology

(Shandong Academy of Sciences), Jinan 250353, China)

Abstract: 12 mm medium-thick pure aluminum and T2 copper were welded by double-side friction stir welding, and the effects of welding speeds on weld formation and mechanical properties of the joint were studied. The results show that the welding speed has little effect on the mechanical properties of the joints when the tool rotational speed is fixed at 600 r/min and the welding speed is 30–50 mm/min, all the joints are fractured on the base material of aluminum. The defect-free welded joints are obtained at the welding speed of 30 mm/min. While the welding speed is 40–50 mm/min, some flat small void defects appear in the joints. However, the joint properties are still higher than that of the pure aluminum due to the copper mixed with the aluminum in the weld which forms a composite structure and enhances the joint properties. When the welding speed is higher than 60 mm/min, the heat input is decreased, which causes the insufficient material flow and forms a void defect through the weld, reduces the load-bearing area of the joint and decreases the tensile strength of joint. The hardness is highest in the middle of the stirring zone, which is twice thermally stirred by the tool. Furthermore, due to the welding distortion caused by the first-pass welding, the second-pass weld has a slightly lower downforce and less heat input than the first-pass weld at the same plunge depth, making the hardness at the bottom of the weld (i.e. the second-pass weld) is less than that at the top of the weld (i.e. the first-pass weld), and the second-pass weld is more likely to form void defects. Considering both the welding efficiency and joint properties, the optimum welding speed is 50 mm/min. The joint performance is comparable to the base metal of aluminum, the optimum tensile strength of 75.6 MPa and elongation of 26% are achieved at the welding speed of 50 mm/min.

Key words: Al/Cu dissimilar welding; double-side friction stir welding; weld formation; mechanical property; welding speed

Foundation item: Project(51905309) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (52170220009Y) supported by the Science and Technology Planning Project of State Grid Henan Electric Power Company, China

Received date: 2021-11-11; **Accepted date:** 2021-12-13

Corresponding author: SHI Lei; Tel: +86-531-88395987; E-mail: lei.shi@sdu.edu.cn

(编辑 李艳红)