DOI: 10.3901/JME.2020.06.004

铝-镁异质合金搅拌摩擦焊接成形的研究进展*

武传松 吕学奇 宿浩 石磊

(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)

摘要: 随着现代工业生产对环境保护、节能减排等要求的不断提高,采用铝、镁等合金的轻量化结构在航空航天、高速列车、汽车制造、新能源等各领域的应用越来越广泛。其中,铝-镁异质合金的连接,面临诸多挑战,也是最亟待解决的关键技术问题之一。与其他连接方法相比,搅拌摩擦焊(Friction stir welding, FSW)在连接铝-镁异质合金时优势明显,近年来也涌现出多种基于 FSW 的改型工艺。根据近年来铝-镁异质合金 FSW 领域的研究进展,全面评述了该领域的研究现状和下一步应重点关注的问题。旨在厘清铝-镁异质合金 FSW 及其改型工艺的物理机制、技术难点和解决思路,推动铝-镁异质结构在汽车等行业中的广泛应用。

关键词: 铝合金; 镁合金; 异质接头; 搅拌摩擦焊

中图分类号: TG402

Research Progress in Dissimilar Friction Stir Welding of Aluminium/Magnesium Alloys

WU Chuansong LÜ Xueqi SU Hao SHI Lei

(MOE Key Laboratory for Liquid-Solid Structural Evolution and Materials Processing, Shandong University, Jinan 250061)

Abstract: With the increasing demand for environmental protection, energy saving and emission reduction, the lightweight structures of aluminum alloys and magnesium alloys are increasingly used in industries such as aerospace, high-speed trains, automobiles, and new energy fields. Particularly, the joining of aluminum-magnesium dissimilar alloys faces many challenges and is one of the key technical issue that needs to be solved urgently. Compared with other joining methods, friction stir welding(FSW) shows a great advantage in joining aluminum-magnesium dissimilar metals. In recent years, some new FSW variant processes have emerged. According to the research progress in the field of aluminum-magnesium dissimilar alloys FSW in recent years, this paper comprehensively reviews the research status, existing problems and the important unsolved issues in this field. The purpose is to clarify the physical mechanism, technical difficulties and solutions of FSW and its modification processes in joining of dissimilar aluminum-magnesium alloys, and promote the wide application of aluminum-magnesium hybrid-structure in the automotive industry.

Key words: aluminum alloys; magnesium alloys; dissimilar joints; friction stir welding

0 前言

汽车工业已经成为全球各国的支柱产业之一^[1]。随着对环境保护、节能减排的要求越来越严格,轻量化已经成为汽车工业未来生存和发展的关键。试验证明,如果整车重量减少 100 kg,每百公里降低 0.6 L 的油耗和 500 g 的 CO₂ 排放量,同时汽车的操控性、加速性与制动性等也会得到明显提升^[2]。改进汽车结构和采用轻质材料是实现轻量化的主要途

径。近年来,随着人们对汽车安全性、科技感、豪华和舒适大空间等的追求,前者已经无太大潜力可寻,因而汽车工业的发展重点普遍在轻质材料的应用上。由于采用金属材料的零部件占整车重量的 85%,因此采用轻质的金属材料是实现汽车工业的现代化,进而增强汽车产品竞争力的最有效途径之一^[2-3]。

铝是目前汽车上最常用的轻质金属材料,其密度为 2.7 g/cm³,是钢的 1/3。铝合金重熔方便,回收率可高达 85%以上;表面易生成氧化膜,因此具有极佳的抗氧化性和耐腐蚀性;有较强的耐冲击性能,使汽车更抗振且更舒适;对标准化设计制造的

* 国家自然科学基金资助项目(51842507, 51475272)。20190902 收到初稿, 20191007 收到修改稿

适应性强, 降低了模具的设计和加工成本, 缩短了生产周期。据国际铝业协会的预测, 轿车的用铝量将在 2020 年达到 $180 \text{ kg}^{[3]}$ 。目前, 铝及其合金材料在汽车车身、轮毂、热交换器、发动机等诸多方面均实现了应用^[4]。

与铝相比, 镁有其独特的性能优势。镁的密度为 1.74 g/cm^3 , 仅为钢的 $1/4$, 是目前工业领域中所使用的最轻金属材料。镁合金具有比铝合金更高的屈服强度与刚度, 冲击载荷下可吸收能量是铝合金的 1.5 倍, 阻尼系数大, 韧性和减振性好。此外, 镁合金铸件尺寸随温度与时间的变化小, 尺寸稳定性好; 无磁性, 电磁屏蔽性能好; 耐腐蚀性、导热性以及可回收性好等。中国的镁产量占据全世界的一半以上, 在汽车轻量化过程中, 镁合金逐步得到重视和应用, 引领汽车工业的未来发展方向。目前, 80% 的镁合金被用在汽车工业中, 在汽车零部件中的应用多达 60 余种, 涉及车身、底盘、内部构造和动力总成等诸多部件^[5-6]。

通过将铝合金与镁合金结合运用, 能够充分利用铝与镁合金的各自优势, 将劣势降到最低, 达到进一步实现汽车轻量化的目的。铝合金和镁合金作为轻质金属材料在以汽车工业为代表的制造行业中的需求快速增长, 铝-镁异质结构的交叉应用趋势愈发突出, 使得铝合金和镁合金异种金属之间的连接迅速成为焊接领域的研究热点之一^[7-8]。

铝-镁异质合金的焊接, 接头中不可避免地生成铝镁金属间化合物(Intermetallic compounds, IMCs), 其二者相互溶解度有限而造成难以形成有效熔合区, 是目前面对的主要问题。铝-镁异质合金的金属间化合物是硬脆相, 易导致焊缝出现裂纹。因此焊接过程中必须要减少其形成且改变其分布形态, 才能达到提高铝-镁异质接头性能的目的。近年来, 研究人员尝试采用钎焊^[9-10]、扩散焊^[11-12]、超声波焊^[13]、激光焊^[14-15]、电阻焊^[16]、电弧焊^[17-19]等各种工艺方法来连接铝-镁异质金属, 但这些方法各自都存在很多问题。铝镁之间的直接熔焊由于热输入较大, 易产生较厚的金属间化合物层; 使用夹层的铝镁异质合金熔焊虽然能在一定程度上抑制铝镁金属间化合物的生成, 但新引入的化合物相对接头性能的改善十分有限。各种缺陷, 如气孔、夹杂以及飞溅等, 使得接头性能在大批量生产中难以得到保障。

作为一种新型的固相连接技术, 搅拌摩擦焊(Friction stir welding, FSW)在焊接过程中热输入较低, 母材不熔化, 只存在塑性状态下的流动, 可有效抑制金属间化合物的生成; 且借助 FSW 高应变率和大变形量的特点, 可有效改善金属间化合物的分

布, 消除或减少传统熔焊中容易出现的一系列缺陷。此外, 国内外焊接科技人员研发了多种 FSW 的改型工艺, 进一步提高了铝-镁异质合金的焊接质量和焊接效率, 并取得了一些新的结果。本文根据近年来铝-镁异质合金 FSW 领域的最新研究进展, 全面评述了该领域的研究现状, 并对目前存在的问题以及下一步应重点关注的问题等进行了总结和预测。

1 铝-镁异质合金的焊接性特点

随着铝-镁异质合金材料结构在汽车工业等领域的逐步应用, 研发铝-镁异质合金的高效、可靠的连接技术十分必要。但是, 由于铝合金与和镁合金在晶体结构和物理化学性质上的差异, 使得铝-镁异质合金的焊接面临着诸多挑战。

铝合金和镁合金均具有较高的化学活性和热传导性, 在铝合金或镁合金的同种金属焊接中就已经存在着很多问题。比如, 较高的化学活性易导致合金元素的氧化、烧损、蒸发, 生成高熔点的氧化物夹杂; 线膨胀系数大, 导致接头裂纹与焊接变形; 氢在常温的铝合金或镁合金中的溶解度低, 导致熔池凝固时易形成氢气孔等。此外, 铝合金热导率较大, 易导致接头的软化, 而镁合金焊接时则易出现严重的晶粒粗化及焊缝下塌等。

由于铝合金和镁合金在物理与化学性质上的差异, 导致铝-镁异质金属焊接的难度更大。表 1 为铝与镁的晶体结构和关键性能参数。铝的晶格是面心立方结构, 而镁的晶格是密排六方结构, 二者的原子半径也略有差别。低温状态下, 铝和镁之间的相互溶解有限。而在高温状态下, 二者无限互溶, 当混合的铝镁液态组织凝固到液固温度线以下时, 则会生成 Al_3Mg_2 、 AlMg 以及 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ 等多种金属间化合物。如图 1 所示为铝-镁二元合金相图。从图中可以看出, 铝和镁的熔点分别为 660°C 和 650°C , 而铝-镁接触后生成铝-镁液化组织或者发生共晶转变的温度最低仅为 437°C 。低温下互溶度小以及较低的液固相转化温度极易导致铝-镁异质合金的结合界面上生成大量的连续层状、且广泛分布的铝-镁金属间化合物, 使得接头的力学性能严重恶化。

表 1 铝与镁的晶体结构和主要物性参数

晶体结构	原子半径/ 10^{-10} m	密度/ (10^3 kg/m^3)	熔点/ $^\circ\text{C}$	线膨胀系数/ ($\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	热导率/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	比热容/ ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
铝 FCC	1.43	2.70	660	24.58	235.2	934.92

镁	HCP	1.60	1.74	650	25.80	156	1 086.9
---	-----	------	------	-----	-------	-----	---------

图 1 铝-镁二元合金相图

2 铝镁合金对接焊时相对位置与工艺参数的影响

搅拌摩擦焊接时, 搅拌头的转速和前进速度, 搅拌头的几何外形与尺寸参数等, 是决定焊接质量的重要因素。另一方面, 铝镁试件相对于搅拌头的位置, 即铝或镁置于前进侧或后退侧、搅拌针偏向铝板或镁板以及偏移量等, 对接头质量也有着重要影响。对于铝-镁异质合金 FSW 的适用工艺条件和主要参数, 国内外开展了大量研究。

MCLEAN 等^[20]开展了 12 mm 厚 AZ31B 镁合金与 AA5083 铝合金的对接 FSW 试验, 采用的搅拌针长度为 10.6 mm, 锥形且带有螺纹。发现将镁板放置于后退侧, 并且搅拌针偏置于镁合金时焊接效果最好。这是因为镁合金相对铝合金较软, 流动性较好, 焊接过程中大量的镁合金被带入搅拌头后侧的空腔, 使其得到很好的填充, 抑制了缺陷的产生。

FIROUZDOR 等^[21-22]研究了不同工艺条件下 1.6 mm 厚 AA6061-T6 铝合金与 AZ31B-H24 镁合金的 FSW 焊缝成形。试验发现, 将镁合金放置在前进侧时获得的焊接工艺参数窗口较宽; 将搅拌针偏置于镁合金一侧, 可进一步拓宽焊接工艺参数窗口。铝-镁异质合金 FSW 对接焊时的热输入低于同质合金时的情况, 这是因为铝-镁异质合金的混合搅拌形成了液态薄膜, 使得搅拌头被润滑, 搅拌头与塑性材料界面的接触状态发生改变, 减少了摩擦所产生的热量。但液态薄膜导致了焊接过程中裂纹的产生, 且易在凝固过程中形成硬脆的金属间化合物, 削弱接头的力学性能^[22]。在铝-镁异质合金 FSW 对接焊时, 焊接热输入在低焊速、高转速、铝合金置于前进侧且搅拌头偏向铝合金时最高。采用低焊速且将镁合金放置于前进侧, 可以有效降低焊接热输入,

减少液态薄膜和金属间化合物的生成, 从而改善接头强度。采用高速焊且将镁合金置于前进侧, 虽然能减少金属间化合物的形成, 但随着焊接热输入的降低, 搅拌区内材料流动不充分, 则易导致隧道型缺陷的产生, 削弱接头性能。在低焊速高转速下进行焊接, 且镁合金置于前进侧时, 热输入降低, 金属间化合物急剧减少。而将铝合金置于前进侧, 搅拌区内出现共晶固溶结构, 表明焊接过程中发生了材料液化的现象^[21-22]。大量的研究表明, 铝合金与搅拌头的较大接触面积会导致较高的热输入, 随着搅拌头由铝合金一侧向镁合金一侧偏移, 热输入逐渐减少。将镁合金置于前进侧, 且搅拌头偏向镁合金, 搅拌区内的材料流动相对比较充分, 铝合金和镁合金易形成交锁的机械连接结构, 利于接头力学性能的提高。在铝-镁异质合金的焊接过程中, 无论铝和镁的相对位置如何, 铝合金侧的峰值温度总是高于镁合金侧^[21]。

YAN 等^[23]进行了 1060 铝与 AZ31 镁的 FSW 焊接, 发现搅拌头不偏置时会导致脆性金属间化合物的生成, 且会有焊接裂纹产生的倾向。但当搅拌头偏置时则没有第二相的生成, 接头拉伸断裂形式为典型的解理断裂。YAMAMOTO 等^[24]将搅拌针向铝合金一侧偏移, 探讨了搅拌针偏移量的大小对接头成分和性能的影响。发现随着偏移量的增大, 金属间化合物的厚度逐渐变宽, 抗拉性能逐渐降低。

由上述讨论可知, 铝-镁板材的相对位置和偏移量等是对焊接热输入、材料塑性流动、界面反应类型等产生影响的重要因素, 进而影响了接头组织与性能。既然金属间化合物是由于金属液化及后续的共晶反应所引发的, 并且结合 Al-Mg 二元合金相图(图 1)可知, 发生 $L \rightarrow \text{Al}_{12}\text{Mg}_{17} + \text{Mg}$ 和 $L \rightarrow \text{Al}_3\text{Mg}_2 + \text{Al}$ 的共晶转变温度分别为 437 °C 和 450 °C。搅拌头向铝合金一侧偏置, 使得其与镁合金的接触摩擦减少, 可以抑制金属间化合物的生成, 提高接头性能。基于以上结论, 康举等^[25]在 7075 铝合金与 AZ31 镁合金的 FSW 对接试验中将搅拌头偏向铝合金一侧, 且将镁合金放置在前进侧, 发现由于焊接热输入降低, 使得 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ 的生成量减小, 但出现了新的金属间化合物 Al_3Mg_2 。将搅拌针向铝合金侧偏移 0.3 mm 时, 得到的接头抗拉强度为 112 MPa。MALARVIZHI 等^[26]考察了搅拌头轴肩尺寸对 6 mm 厚 6061 铝合金与 AZ31 镁合金异质 FSW 接头宏观成形、微观组织与拉伸性能的影响。发现当轴肩直径与板材厚度的比值为 3.5 时, 接头力学性能最好。

焊接速度和搅拌头的旋转速度是 FSW 焊接过程两个主要的工艺参数, 对接头的组织和性能有非常显著的影响。一般用旋转速度(R_t)与焊接速度(V)的比值(R_t/V)来衡量两个参数对接头质量的影响。大量的试验研究表明, 焊接热输入与 R_t/V 值呈正相关的关系, 焊接热输入过大, 表面易产生如犁沟、孔洞等焊接缺陷。MORISHIGE 等^[27]发现, 较低的 R_t/V 值可以抑制接头处金属间化合物的生成, 接头抗拉强度与延展性都有所提高。SIMONCINI 等^[28]研究了铝-镁异质接头性能与 R_t/V 值的关系, 发现接头的抗拉强度受 R_t 和 V 的影响较大, 延展性则与焊接参数的关系不明显。KWON 等^[29]认为, 将搅拌头转速提高到 1 000~1 400 r/min 时可以明显改善接头搅拌区的表面成形, 但是接头的拉伸强度与延展性并没有因此得到明显的变化。KHODIR 等^[30]发现焊接速度对热影响区和热力影响区(前进侧、铝合金侧)硬度的影响明显, 接头硬度与金属间化合物、镁合金和铝合金的微观组织有关。若采用时效强化的铝合金材料, 受焊接热循环的影响, 导致热影响区内伴随着第二相粒子的溶解和析出, 且分布不均匀。测试过程中, 当硬度计打到第二相粒子密集区时硬度值较高; 反之, 则较低。

3 铝-镁异质接头的宏观与微观形貌

如图 2 所示^[31]为典型的铝-镁异质合金 FSW 接头的宏观形貌, 可以清楚地看到两种合金的结合界面, 界面两侧的形貌与同种金属 FSW 接头形貌相似。从图中可以看出, 铝-镁异质 FSW 接头可划分为搅拌区(Stirring zone, SZ)或焊核区(Weld nugget zone, WNZ)、热力影响区(Thermo-mechanically affected zone, TMAZ)、热影响区(Heat affected zone, HAZ)和母材区(Base material, BM)。

图 2 铝-镁异质金属 FSW 接头宏观形貌

KHODIR 等^[30]开展高转速下 2024 铝合金和 AZ31 镁合金的 FSW 试验。观察接头的宏观形貌并将搅拌区划分为明亮、暗灰色与灰色三个区域, 如图 3 所示^[30]。其中, 明亮区域对应 2024 铝合金, 暗灰色区域对应 AZ31 镁合金。灰色区域内结构形态不规则并包含一些镁合金碎片, 是二者的相互混合区域。焊接过程中铝合金置于前进侧, 在前进侧的 WNZ 与 TMAZ 的边界处, 出现了层片状的结构。

提高焊接速度可以改变三个区域的分布形态和位置, 这可能是由于焊接热输入的变化, 进而影响塑性金属的流动所导致的。相对于铝合金, 镁合金的成型性差, 提高焊接速度或者降低热输入等均会导致镁合金塑性流动能力降低。镁合金 WNZ 与 TMAZ 内的晶粒尺寸随焊接速度的增大而减小。WNZ 内的不规则区域和薄片状区域均含有由于持续的金属液化而产生的大量金属间化合物。但 ZETTLER 等^[32]在对 6040 铝合金和 AZ31 镁合金进行 FSW 焊接时发现, 在 WNZ 的上下两部分金属的含量存在差异。上半部分由于主要受轴肩的影响, 基本上都是铝合金, 而下半部分则是由铝合金和镁合金形成的混合区域, 其中既有铝合金受到搅拌作用进入镁合金基体而形成的条带状结构, 也有铝合金和镁合金混合搅拌而形成的旋涡状结构。

(a) 焊接速度 200 mm/min

(b) 焊接速度 300 mm/min

图 3 2024 铝合金与 AZ31 镁合金 FSW 接头

MALARVIZHI 等^[26]将铝-镁结合界面从上表面到下表面分为轴肩影响区、过渡区、搅拌针影响区和涡流区, 如图 4 所示^[26]。观察发现, 界面附近区域内的晶粒得到明显的细化, 且与母材过渡区有着明显的界限; 过渡区内的镁合金一侧发生了明显的动态再结晶现象, 生成了细小均匀的等轴晶粒。如图 5 所示^[33], SOMASEKHARAN 等^[33]把焊缝区域划分为呈现层片状剪切带的区域 D、伴随旋涡状形态的分层插入带的区域 E、铝合金侧过渡区域 F 和镁合金侧过渡区域 C。

图4 镁-铝异质FSW接头不同区域的微观组织形貌

图5 6061铝合金和AZ31镁合金FSW接头

此外,大量的试验表明^[23, 30, 32-33],焊接过程中搅拌区内会发生强烈的动态再结晶行为,生成细小均匀的等轴铝合金和镁合金晶粒组织。搅拌头周围存在着复杂的材料塑性流动,在不同部位形成了铝镁相互混合的片层带、带状带以及涡流状的交锁混合结构。片层带中,铝合金和镁合金的条带相互交错分布,二者之间的界线相对模糊;带状带中,富铝的条带在搅拌头的作用下插入到细小均匀等轴镁合金晶粒组织中;而在涡流状区域中,则呈现铝合金和镁合金的动态再结晶组织严重的交叉流动模式,二者相互盘绕而形成相互啮合的旋涡状结构。

4 铝-镁接头界面的金属间化合物

在异质合金接头的结合界面上,出现薄且均匀的金属间化合物层则标志着二者之间产生了良好冶金结合,有利于提高接头的力学性能^[34]。但目前铝-镁异质合金的常规FSW过程中,易产生过量的金属间化合物,恶化接头的力学性能^[23, 31, 35]。人们开展了很多工作,对铝-镁异质接头FSW过程中金属间化合物的成分、含量、分布形态、生成机制和演变规律等进行了广泛研究。较为常见的研究手段是采用能谱仪(Energy dispersive spectrometer, EDS或Energy dispersive X-ray spectroscopy, EDX)测定结合界面或者焊接过渡区内局部区域的元素成分,进而结合Al-Mg二元合金相图对所生成的金属间化合物类型或其他生成相进行间接推测与确认^[36-38]。一些研究者还通过利用透射电镜(Transmission electron

microscope, TEM)对金属间化合物的形貌、分布形态以及晶型等进行同位分析。其他常见的用于确定金属间化合物类型的方法还有电子探针(Electron probe micro-analysis, EPMA)和X射线衍射(X-ray diffraction, XRD)等。此外,还可以采用染色蚀刻法和背散射电子像等对金属间化合物分布形态进行直观观察。

KLAG等^[39]采用扫描电子显微镜(Scanning electron microscope, SEM)观察发现,在铝-镁异质FSW接头的结合界面上存在连续而毗邻且厚度达到6 μm左右的两层金属间化合物,如图6所示^[39]。采用EDS点扫描定量分析,并结合铝-镁二元合金相图,发现这两种金属间化合物的成分分别是靠近铝侧的 Al_3Mg_2 和靠近镁侧的 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$,而拉伸试验证实断口从金属间化合物层经过。YAN等^[23]认为在铝-镁结合界面处形成的涡流状组织有利于机械交锁结构的形成,进而提高接头的拉伸性能,且发现金属化合物层周围的焊核区内铝-镁混合组织呈现洋葱环状或者涡流状的分布形态。

图6 铝-镁异质金属FSW结合界面上的金属间化合物层及铝、镁元素的EDS面扫描结果

FU等^[40]开展了3 mm厚6061铝合金和AZ31B镁合金的FSW对接试验,且对所采用试验参数进行了优化,即将镁合金置于前进侧,搅拌头偏向镁合金0.3 mm,搅拌头转速为700 r/min,焊接速度为50 mm/min。研究发现,在此焊接参数下,铝-镁异质合金接头的结合界面上依旧可以观察到两层金属间化合物,即靠近铝侧的 Al_3Mg_2 和靠近镁侧的 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$,其总厚度达3 μm以上,而在焊核区其他部位也发现了铝-镁的共晶组织。YAMAMOTO等^[24]采用透射电镜观察了铝-镁FSW接头结合界面处的金属化合物层,而力学试验则证实铝-镁异种合金接头的拉伸性能与金属间化合物层的厚度有着明显的

关系, 焊接接头的拉伸性能会随金属间化合物层厚度的增加而急剧恶化。研究还发现, 界面处金属间化合物层的厚度随着扩散时间增加, 且认为其形成和生长均受到反应扩散的控制^[24]。包括 SATO 等^[36]、ZETTLER 等^[32]和 FIROUZDOR 等^[22]在内的众多学者均证实, 6061 铝合金和镁合金焊接时所产生的金属间化合物是由于成分液化以及随后的共晶反应而导致的。

此外, 研究者发现混合区域内金属间化合物条带状物的数量、形状、取向和分布均对铝-镁异质合金接头的拉伸强度和延展性等有着显著的影响。LIANG 等^[41]和 SHI 等^[42]的研究证实, 导致裂纹扩展的主要因素是与横向成 45° 的带状金属间化合物。

5 铝/镁异种合金的 FSW 工艺改型

大量的试验结果表明, 铝-镁异质合金 FSW 接头的性能, 如作为工程应用重要指标的拉伸性能, 相较于电弧焊、激光焊和扩散焊等均有显著提高。但由于仍然不可避免地产生脆性的铝-镁金属间化合物, FSW 接头的抗拉强度和延展性依然相对较低。因此, 在考虑铝合金和镁合金的物理化学性质, 以及考虑铝-镁异质合金 FSW 连接特点的基础上, 对传统的 FSW 工艺加以改进, 进一步减小铝-镁异质接头结合界面上金属间化合物层的厚度, 并改善金属间化合物的类型、形态和分布特点, 加强接头的机械交锁混合程度, 具有十分重要的意义, 成为了目前的研究热点。近年来, 国内外研究者在这方面开展了一些探索, 取得了一些成效。

5.1 加速冷却或增加辅助热源的 FSW

MOFID 等^[43-44]提出在水下和液氮的环境中开展铝-镁异质合金 FSW 试验, 并与在空气中进行的 FSW 试验进行相比。研究发现, 低温环境有效地抑制了硬脆的金属间化合物的形成, 提高了接头的拉伸性能。ZHAO 等^[45-46]采用 2.5 mm 厚 6013 铝合金与 AZ31 镁合金进行了水下 FSW 研究, 重点探讨了接头的组织演变与性能。EPMA 成像显示经过搅拌后在焊核区内形成铝和镁二者的混合结构, 生成了层片状的再结晶铝合金和镁合金。与空气中 FSW 工艺相比, 水下铝-镁 FSW 接头的金属间化合物层变薄很多, 抗拉性能可达到镁合金母材的 63.3%。CHANG 等^[47]采用激光束为辅助热源, 在铝合金和镁合金合金之间加入厚度为 0.5 mm 的纯 Ni 层。Ni 的加入有效地减少了铝和镁的直接接触, 非脆性的 NiAl、Ni₂Al、Ni₃Al 等化合物一定程度上取代了硬脆的铝镁金属间化合物 Al₁₂Mg₁₇, 接头的拉伸强度

可达到镁合金母材的 66 %

然而, 以上这些通过冷却(水下和液氮的 FSW)或采用辅助热源(激光 FSW)的工艺方法有一些共同的缺点, 即需要对设备进行大幅的改造, 成本较高, 且操作复杂; 此外, 铝合金对激光的反射率高, 辅助能源的利用率低, 激光 FSW 工艺效果有限。

5.2 将超声施加在搅拌头前方附近工件上的 UVeFSW

作为一种机械能, 超声振动施加在塑性变形金属材料上时, 可以降低其变形抗力^[48]。受此启发, 作者课题组直接将超声振动施加在搅拌头前方的待焊金属工件上, 研发了超声振动强化的搅拌摩擦焊新工艺 (Ultrasonic vibration enhanced FSW, UVeFSW), 其原理如图 7 所示。目的主要是利用超声振动来降低焊缝区域内金属材料的屈服应力, 提高其塑性流动的能力, 减小搅拌头-工件接触界面上的摩擦力, 降低搅拌头所受的轴向压力和扭矩, 减小搅拌头的磨损等。在同种铝合金的试验中, UVeFSW 展现出了良好的工艺效果, 扩大了焊接工艺参数窗口, 增大了塑性变形区域的体积, 并改善了接头的组织与力学性能等^[49-51]。近期, 作者课题组将 UVeFSW 新工艺用于铝-镁异质合金的连接, 开展了不同相对位置(铝合金和镁合金分别处于前进侧)、搅拌针偏移量、焊接工艺参数和超声输出功率等条件下的 FSW 与 UVeFSW 的对接试验。结果表明, 超声振动明显地改善了焊缝的表面成形, 一定程度上消除了孔洞、隧道和未焊合等焊接缺陷, 扩大了焊接工艺参数窗口^[52-55]。

图 7 超声振动强化搅拌摩擦焊 UVeFSW 原理示意图

如图 8 所示^[55]为焊接速度为 50 mm/min, 不同搅拌头旋转速度条件下 FSW 和 UVeFSW 接头的宏观形貌。用搅拌头的中心轴线到焊核区边缘的水平距离 D 来表征前进侧的宽度, 分别测量了距离接头底面 1.5 mm 处 FSW 和 UVeFSW 的焊核区宽度 D_f 和 D_w 。可以看出, 600 r/min 时, D_f 与 D_w 分别为 2.43 mm 和 2.53 mm; 700 r/min 时, D_f 与 D_w 分别为 2.27 mm 和 2.45 mm; 800 r/min 时, D_f 与 D_w 分别为

1.82 mm 和 2.36 mm。可以看出, $D_{uv} > D_p$, 表明在 FSW 过程中施加超声振动, 可以增加搅拌针周围塑性变形材料的体积。图 8e 和 8f 中搅拌头的中心轴线与虚线的夹角可以用来表征材料的塑性流动轨迹, 图中虚线为焊核区内两个亚区域, 即上部的条带状组织区 (Banded zone, BZ) 与下部的剧烈混合区 (Severe intercalated zone, SIZ) 之间的交界线。通过测量可以得出, 在旋转速度为 800 r/min 时, 搅拌头的中心轴线与上述交界线的夹角在 FSW 和 UVeFSW 接头的角度分别为 52° 和 61° 。可见, UVeFSW 工艺过程中搅拌头周围塑性材料的流动轨迹半径更大, 表明在超声振动的作用下, 搅拌头周围金属材料的黏度和抗塑性变形的流动应力减小。因此, 超声增加了材料的塑性变形能力, 改善了材料的流动, 增大了焊核区的宽度。

图 8 FSW 和 UVeFSW 接头的焊缝宏观形貌(图中数字表示为从搅拌头中心轴线至前进侧 WNZ-TMAZ 界线的距离)

如图 9 所示^[55]为镁合金在前进侧、搅拌针偏移量分别为 -0.3 mm (偏向铝侧)、 0 mm 和 $+0.3$ mm (偏向镁侧) 时, FSW 和 UVeFSW (功率为 160 W) 铝-镁异质合金接头界面处的扫描电镜 (Scanning electron microscope, SEM) 图像。可以看出, 不同工艺条件下的结合界面上都生成了亮灰色的铝-镁金属间化合物, 且主要为单层的分布状态。FSW 接头结合界面处的铝-镁金属间化合物层的厚度均达到了 $2.5 \mu\text{m}$ 以上 (图 9a、9c 和 9e)。施加超声振动后, 结合界面处的铝-镁金属间化合物层的厚度在搅拌针偏移量为 -0.3 mm、 0 mm 以及 $+0.3$ mm 时分别减小为 2.0 mm (图 9b)、 1.0 mm (图 9d) 和 1.2 mm (图 9f)。尤其当搅拌针偏移量为 0 mm 时 (图 9c 和 9d), 施加超声振动使金属间化合物层的厚度大幅减少了 60%。如图 10 所示^[54]为不同焊接参数和工艺下的 EDS 线扫描结果 (沿图 9 中的黑色虚线)。可以看出, UVeFSW 接头相对于与 FSW 接头界面处镁元素的扩散通道更加流畅, 分布曲线在扩散区域内更加平滑和通顺, 说明超声振动有效地抑制了界面处镁元素的聚集而引发的金属间化合物的生长, 增大了铝合金固溶体中镁的固溶度 (图 10d 和 10f)。EDS 定量化学分析的结果表明, 铝-镁异质合金接头结合界面上的金属间化合物成分均为 Al_3Mg_2 。测试铝-镁异质合金 FSW 和 UVeFSW 接头的拉伸性能可以发现, 在搅拌头旋转速度为 700 r/min 和 800 r/min 时, UVeFSW 接头的抗拉强度高于 FSW 接头^[54]。此外, 超声振动能量增强了铝-镁异质合金接头结合界面处的机械锁合程度。焊接载荷实时监测也表明, 搅拌头的轴向下压力、焊接阻力和扭矩等在施加了超声振动之后均出现了明显的降低^[52-55]。

图 9 FSW 与 UVeFSW 接头界面处的 SEM 形貌

图 10 FSW 与 UVeFSW 接头界面处的 EDS 线扫描分析结果

5.3 从工件底部施加沿工件厚度方向振动的超声

如图 11 所示,JI 等^[56]使用特殊的超声工具头,将超声振动能量从待焊工件的背面施加,研究讨论了 6061-T6 铝合金与 AZ31B 镁合金的搅拌摩擦点焊 (Friction stir spot welding, FSSW) 试验过程中超声振动对材料塑性流动、微观组织演变和金属间化合物形成等的影响。结果表明,施加超声振动细化了焊缝组织的晶粒,使得底部铝合金塑性金属向上部流动更加充分,增强了上下板材的机械混合程度,增加了塑性材料的塑性变形半径。值得指出的是,采用常规 FSSW 工艺,搭接界面上金属间化合物以 Al_3Mg_2 为主;而采用施加超声振动的 FSSW 工艺,即 UaFSSW 后,接头界面上金属间化合物以

$\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ 为主。进一步地,JI 等^[57-58]采用静止轴肩(焊接过程中轴肩不旋转)搅拌头,将超声施加于被焊镁合金板的背部垫板上,与焊缝中心线距离为 20 mm,如图 12 所示^[57],所采用的超声振动施加功率为 1 600 W,开展了 6061-T6 铝合金和 AZ31B 镁合金的异种 FSW 和 UaFSW 对接焊试验^[58]。研究发现,施加超声振动后,接头的拉伸强度和伸长率等均较不加超声时有显著的提高。

图 11 工件背部施加超声振动的搅拌摩擦点焊示意图

图 12 静止轴肩 UaFSW 的示意图

LIU 等^[59]对 6061-T6 铝合金和 AZ31B 镁合金进行了 FSW 与 UaFSW 对接焊试验, 超声施加功率为 1 400 W。结果显示, 相对于 FSW 接头, UaFSW 接头的焊缝形貌大为改善, 接头界面上铝-镁异种金属的机械交锁混合增强。在超声的作用下, 热力影响区与焊核区结合界面附近连续的金属间化合物层被破坏, 成为碎片状或颗粒状, 如图 13 所示^[59]。因此, UaFSW 接头的抗拉强度和延伸率均较 FSW 接头有所增强, 断裂形式也出现了塑性与脆性混合共存的情况。

图 13 结合界面处金属间化合物分布

5.4 从工件侧向施加横向振动的超声

超声补偿搅拌摩擦焊(Ultrasound supported-FSW, US-FSW)^[60]是另一种新颖的超声施加方式。如图 14 所示^[60], 研究者将超声点焊装置加以改造, 从工件一侧施加横向超声, 用于铝-镁异质合金的 FSW 焊接, 焊接过程中保持搅拌头与超声振动头的协调统一运动。STRASS 等^[61]利用 US-FSW 设备对 AA5454 铝合金和 AZ91 镁合金进行了焊接试验。结果表明, 超声对接头性能的提高幅度可达 30%, 且接头断口表面相对于常规 FSW 接头断口变得更加曲折。BENFER 等^[62]对 3.3 mm 厚的 AC-4800 铝合金和 AZ80 镁合金进行了 FSW 与 US-FSW 的对接焊

试验。由图 15 可以看出^[62], 焊核区内片层状镁合金组织(暗黑色部分)含量明显升高, 表明超声使得接头焊核区内材料的搅拌行为增强, 铝-镁异种合金

图 14 在工件侧边施加超声的 FSW 设备

图 15 焊缝横截面的对比

的机械混合程度提高。焊核区与镁合金母材区交界处的边际走向在超声的作用下发生了改变, 断裂路径变长。另外, 对接头进行 SEM 观察和 EDX 分析也可以发现, 超声有效地抑制了 Al_3Mg_2 的生成, 但 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ 层厚度则有明显的增大, 由未加超声时的 2 μm 增加到超声辅助时的 50 μm , 如图 16 所示^[63]。对不同工艺条件下的接头力学性能分析发现, 施加超声后接头的抗拉强度提高了 25%, 断口形貌也变得更加曲折。上述结果均表明超声对铝-镁金属间化合物的形成和分布有着极其显著的影响。

图 16 界面金属间化合物分布示意图

6 结论与展望

搅拌摩擦焊接工艺方法已在铝-镁异质合金连接方面展现出了巨大的优势,并得到了广泛的应用。国内外研究者针对多种铝合金和镁合金开展了FSW工艺试验,分析了不同工艺条件下的焊缝成形、宏观组织、界面形貌,以及金属间化合物的厚度、种类、形态以及分布特征等,测试了接头的硬度、拉伸性能和断口形貌。在此基础上,一些研究者尝试通过在水中或液氮中开展FSW试验,或采用施加激光或者超声振动等的改型方法,均取得了一定的工艺效果。然而,铝-镁异质合金的常规FSW和改型FSW焊接,仍存在一些亟待解决的问题,同时也面临着新的发展机遇,未来应在以下几个方面开展深入研究。

(1) 结合界面上的铝-镁金属间化合物层,严重恶化接头力学性能。需要深入探究金属间化合物的厚度、种类和形态特征等与抗拉强度之间的关系,实现对金属间化合物的调控。

(2) 应考察搅拌头的几何特征等对铝-镁异种金属材料塑性流动和混合程度的影响机制。通过观察不同搅拌头作用情况下的铝-镁异质材料的混合情况、缺陷形成和接头抗拉强度、断口位置等,总结规律并积累大量的数据,实现对铝镁异质合金FSW过程中搅拌头的优化设计。

(3) 超声振动已在FSW过程中展现出了突出的作用。未来应着重深入研究超声振动能场与FSW热力过程的耦合机制,获得超声功率与FSW热力参数的最佳匹配范围,将超声能量的作用发挥到最大,以达到最佳的接头组织与性能。

(4) 当前,仍主要依赖试验的方法开展铝-镁异种合金常规FSW和改型FSW的研究。未来应充分考虑铝-镁异种合金的焊接特点,建立完善的多物理场耦合模型。通过采用数值模拟的方法,定量分析工艺条件和参数对焊接过程和焊接质量的影响规律和机制,深入揭示铝-镁异种合金常规FSW和各种改型FSW工艺的机理。

参考文献

- [1] DEBBARMA S, KAUSHIK G. Assessing the impact of transportation on climate Change: A case study of Agartala City in India's north east region// Handbook of Research on Environmental Policies for Emergency Management and Public Safety[M]. IGI Global, 2018: 275-299.
- [2] 李永兵, 马运五, 楼铭, 等. 轻量化多材料汽车车身连接技术进展[J]. 机械工程学报, 2016, 52(24): 1-23.
- LI Yongbing, MA Yunwu, LOU Ming, et al. Advances in

welding and joining processes of multi-material lightweight car body[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(24): 1-23.

- [3] 黄文森, 童德祥, 蔡月华, 等. 铝合金型材在汽车轻量化中的应用[C/CD]//LW2016 第六届铝加工技术(国际)论坛, 杭州, 2016.
- HUANG Wensen, TONG Dexiang, CAI Yuehua, et al. Application of aluminum alloy extrusions in lightweight of automobile[C/CD]//LW2016, Hangzhou, 2016.
- [4] 刘静安, 刘煜. 铝材在汽车上的开发应用及重点新材料产品研发方向[C/CD]//LW2013 第五届铝型材技术(国际)论坛, 广州, 2013.
- LIU Jingan, LIU Yu. Development and application of aluminum alloy extrusions in automobile and research direction of key new materials products[C/CD]//LW2013, Guangzhou, 2013.
- [5] 陈军. 镁合金在汽车工业中的应用分析[J]. 材料研究与应用, 2010(2): 81-84.
- CHEN Jun. Application analysis of magnesium alloy in automotive industry[J]. Materials Research and Application, 2010(2): 81-84.
- [6] LUO A A. Magnesium casting technology for structural applications[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2013, 1(1): 2-22.
- [7] SHAH L H, OTHMAN N H, GERLICH A. Review of research progress on aluminum-magnesium dissimilar friction stir welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2018, 23: 256-270.
- [8] 马宗义, 商乔, 倪丁瑞, 等. 镁合金搅拌摩擦焊接的研究现状与展望[J]. 金属学报, 2018, 54(11): 1594-1617.
- MA Zongyi, SHANG Qiao, NI Dingrui, et al. Friction stir welding of magnesium alloy: A review[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2018, 54(11): 1594-1617.
- [9] 王志, 刘飞, 刘黎明. 钎焊温度及保温时间对 Sn-30Zn 钎料钎焊 Mg/Al 异种金属组织和性能的影响[J]. 焊接学报, 2012, 33(10): 79-82.
- WANG Zhi, LIU Fei, LIU Liming. Effect of brazing temperature and holding time on microstructure and strength of brazed joints between dissimilar materials Mg/Al[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(10): 79-82.
- [10] LIU L, TAN J, LIU X. Reactive brazing of Al alloy to Mg alloy using zinc-based brazing alloy[J]. Materials Letters, 2007, 61(11-12): 2373-2377.
- [11] MAHENDRAN G, BALASUBRAMANIAN V, SENTHILVELAN T. Developing diffusion bonding windows for joining AZ31B magnesium-AA2024 aluminium alloys[J]. Materials & Design, 2009, 30(4): 1240-1244.

- [12] MAHENDRAN G, BABU S, BALASUBRAMANIAN V. Analyzing the effect of diffusion bonding process parameters on bond characteristics of Mg-Al dissimilar joints[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2010, 19(5): 657-665.
- [13] PATEL V K, BHOLE S D, CHEN D L. Microstructure and mechanical properties of dissimilar welded Mg-Al joints by ultrasonic spot welding technique[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2013, 17(3): 202-206.
- [14] BORRISUTTEKUL R, MIYASHITA Y, MUTOH Y. Dissimilar material laser welding between magnesium alloy AZ31B and aluminum alloy A5052-O[J]. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2005, 6(2): 199-204.
- [15] LIU L M, WANG H Y, ZHANG Z D. The analysis of laser weld bonding of Al alloy to Mg alloy[J]. *Scripta Materialia*, 2007, 56(6): 473-476.
- [16] 孙梦. 基于中间层的 AZ31 镁合金/5052 铝合金电阻点焊焊接性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- SUN Meng. Study on the resistance spot weldability of AZ31 magnesium alloy to 5052 aluminum alloy with different interlayers[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [17] LIU F, ZHANG Z, LIU L. Microstructure evolution of Al/Mg butt joints welded by gas tungsten arc with Zn filler metal[J]. *Materials Characterization*, 2012, 69: 84-89.
- [18] ZHANG H T, SONG J Q. Microstructural evolution of aluminum/magnesium lap joints welded using MIG process with zinc foil as an interlayer[J]. *Materials Letters*, 2011, 65(21-22): 3292-3294.
- [19] 王克鸿, 朱功杰, 余进. 铝合金与镁合金直流双脉冲 MIG 焊接接头组织与性能研究[J]. *机械制造与自动化*, 2017(1): 29-31.
- WANG Kehong, ZHU Gongjie, YU Jin. Study of mechanical properties and structure of Al-Mg dissimilar welding joint with DC double pulse MIG[J]. *Mechanical Manufacturing and Automation*, 2017(1): 29-31.
- [20] MCLEAN A A, POWELL G L F, BROWN I H, et al. Friction stir welding of magnesium alloy AZ31B to aluminium alloy 5083[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2013, 8(6): 462-464.
- [21] FIROUZDOR V, KOU S. Al-to-Mg friction stir welding: effect of material position, travel speed, and rotation speed[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2010, 41(11): 2914-2935.
- [22] FIROUZDOR V, KOU S. Formation of liquid and intermetallics in Al-to-Mg friction stir welding[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2010, 41: 3238-3250.
- [23] YAN J, XU Z, LI Z, et al. Microstructure characteristics and performance of dissimilar welds between magnesium alloy and aluminum formed by friction stirring[J]. *Scripta Materialia*, 2005, 53(5): 585-589.
- [24] YAMAMOTO N, LIAO J, WATANABE S, et al. Effect of intermetallic compound layer on tensile strength of dissimilar friction-stir weld of a high strength Mg alloy and Al alloy[J]. *Materials Transactions*, 2009, 50(12): 2833-2838.
- [25] 康举, 付瑞东, 栾国红, 等. 搅拌针偏移对 7075 铝合金-AZ31 镁合金接头组织及性能的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2011(S2): 294-299.
- KANG Ju, FU Ruidong, LUAN Guohong, et al. Effect of the pin offsetting on microstructures and mechanical properties of FSW joints of 7075 Al alloy-AZ31B Mg alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2011(S2): 294-299.
- [26] MALAVIZHI S, BALASUBRAMANIAN V. Influences of tool shoulder diameter to plate thickness ratio (D/T) on stir zone formation and tensile properties of friction stir welded dissimilar joints of AA6061 aluminum-AZ31B magnesium alloys[J]. *Materials & Design*, 2012, 40: 453-460.
- [27] MORISHIGE T, KAWAGUCHI A, TSUJIKAWA M, et al. Dissimilar welding of Al and Mg alloys by FSW[J]. *Materials Transactions*, 2008, 9(5): 1129-1131.
- [28] SIMONCINI M, FORCELESE A. Effect of the welding parameters and tool configuration on micro- and macro-mechanical properties of similar and dissimilar FSWed joints in AA5754 and AZ31 thin sheets[J]. *Materials & Design*, 2012, 41: 50-60.
- [29] KWON Y J, SHIGEMATSU I, SAITO N. Dissimilar friction stir welding between magnesium and aluminum alloys[J]. *Materials Letters*, 2008, 62(23): 3827-3829.
- [30] KHODIR S A, SHIBAYANAGI T. Dissimilar friction stir welded joints between 2024-T3 aluminum alloy and AZ31 magnesium alloy[J]. *Materials Transactions*, 2007, 48(9): 2501-2505.
- [31] DORBANE A, MANSOOR B, AYOUB G, et al. Mechanical, microstructural and fracture properties of dissimilar welds produced by friction stir welding of AZ31B and Al6061[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 651: 720-733.
- [32] ZETTLER R, DA SILVA A A M, RODRIGUES S, et al. Dissimilar Al to Mg alloy friction stir welds[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2006, 8(5): 415-421.
- [33] SOMASEKHARAN A C, MURR L E. Microstructures in

- friction-stir welded dissimilar magnesium alloys and magnesium alloys to 6061-T6 aluminum alloy[J]. *Materials Characterization*, 2004, 52(1): 49-64.
- [34] XUE P, XIAO B L, WANG D, et al. Achieving high property friction stir welded aluminium/copper lap joint at low heat input[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2011, 16(8): 657-661.
- [35] VENKATESWARAN P, REYNOLDS A P. Factors affecting the properties of friction stir welds between aluminum and magnesium alloys[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, 545: 26-37.
- [36] SATO Y S, PARK S H C, MICHIOUCHI M, et al. Constitutional liquation during dissimilar friction stir welding of Al and Mg alloys[J]. *Scripta Materialia*, 2004, 50(9): 1233-1236.
- [37] ZHANG H, CHEN Y, LUO A A. A novel aluminum surface treatment for improved bonding in magnesium/aluminum bimetallic castings[J]. *Scripta Materialia*, 2014, 86: 52-55.
- [38] SUHUDDIN U F H, FISCHER V, DOS SANTOS J F. The thermal cycle during the dissimilar friction spot welding of aluminum and magnesium alloy[J]. *Scripta Materialia*, 2013, 68(1): 87-90.
- [39] KLAG O, GROEBNER J, WAGNER G, et al. Microstructure and thermodynamic investigations on friction stir welded Mg/Al-joints[J]. *International Journal of Materials Research*, 2014, 105(2): 145-155.
- [40] FU B, QIN G, 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.
- [41] LIANG Z, CHEN K, WANG X, et al. Effect of tool offset and tool rotational speed on enhancing mechanical property of Al/Mg dissimilar FSW joints[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2013, 44: 3721-3731.
- [42] SHI H, CHEN K, LIANG Z, et al. Intermetallic compounds in the banded structure and their effect on mechanical properties of Al/Mg dissimilar friction stir welding joints[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2017, 33(4): 359-366.
- [43] 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.
- [44] MOFID M A, ABDOLLAH-ZADEH A, GUR C H. Investigating the formation of intermetallic compounds during friction stir welding of magnesium alloy to aluminum alloy in air and under liquid nitrogen[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 71(5-8): 1493-1499.
- [45] ZHAO Y, LU Z, YAN K, et al. Microstructural characterizations and mechanical properties in underwater friction stir welding of aluminum and magnesium dissimilar alloys[J]. *Materials & Design*, 2015, 65: 675-681.
- [46] 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]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 83(1-4): 673-679.
- [47] CHANG W, RAJESH S R, CHUN C, et al. Microstructure and mechanical properties of hybrid laser-friction stir welding between AA6061-T6 Al alloy and AZ31 Mg alloy[J]. *Journal of Materials Science and Technology*, 2011, 27(3): 199-204.
- [48] DAUD Y, LUCAS M, HUANG Z. Modelling the effects of superimposed ultrasonic vibrations on tension and compression tests of aluminium[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 186(1-3): 179-190.
- [49] 武传松, 刘小超, 张皓庭. 超声振动辅助搅拌摩擦焊工艺及装置: ZL201210244175.8[P]. 2013-02-13.
- WU Chuansong, LIU Xiaochao, ZHANG Haoting. Process and installation of ultrasonic vibration enhanced friction stir welding: ZL201210244175.8[P]. 2013-02-13.
- [50] LIU X C, WU C S, PADHY G K. Improved weld macrosection, microstructure and mechanical properties of 2024-T4 butt joints in ultrasonic vibration enhanced friction stir welding[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2015, 20(4): 345-352.
- [51] ZHONG Y B, WU C S, PADHY G K. Effect of ultrasonic vibration on welding load, temperature and material flow in friction stir welding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 239: 273-283.
- [52] 吕学奇, 杨春靓, 武传松. 铝-镁合金的超声振动强化搅拌摩擦焊试验研究[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(24): 58-64.
- LÜ Xueqi, YANG Chunliang, WU Chuansong. Experimental investigation on ultrasonic vibration enhanced FSW of Al-Mg dissimilar materials[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(24): 58-64.
- [53] LV X Q, WU C S, PADHY G K. Weld microstructure and mechanical properties in ultrasonic enhanced friction stir welding of Al alloy to Mg alloy[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 254: 145-157.
- [54] LV X Q, WU C S, PADHY G K. Diminishing intermetallic compound layer in ultrasonic vibration enhanced friction stir welding of aluminum alloy to

- magnesium alloy[J]. *Materials Letters*, 2017, 230: 81-84.
- [55] 吕学奇. 超声振动对 Al/Mg 异种合金搅拌摩擦焊接接头组织与性能的影响[D]. 济南: 山东大学, 2018.
- LÜ Xueqi. Study on the resistance spot weldability of AZ31 magnesium alloy to 5052 aluminum alloy with different interlayers[D]. Jinan: Shandong University, 2018.
- [56] JI S D, LI Z W, MA L, et al. Investigation of ultrasonic assisted friction stir spot welding of magnesium alloy to aluminum alloy[J]. *Strength of Materials*, 2016, 48(1): 2-7.
- [57] JI S, MENG X, LIU Z, et al. Dissimilar friction stir welding of 6061 aluminum alloy and AZ31 magnesium alloy assisted with ultrasonic[J]. *Materials Letters*, 2017, 201: 173-176.
- [58] JI S, HUANG R, MENG X, et al. Enhancing friction stir weldability of 6061-T6 Al and AZ31B Mg alloys assisted by external non-rotational shoulder[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2017, 26(5): 2359-2367.
- [59] LIU Z, MENG X, JI S, et al. Improving tensile properties of Al/Mg joint by smashing intermetallic compounds via ultrasonic-assisted stationary shoulder friction stir welding[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, 31: 552-559.
- [60] STRASS B, WAGNER G, EIFLER D. Realization of Al/Mg-hybrid-joints by ultrasound supported friction stir welding[J]. *Materials Science Forum*, 2014, 783-786: 1814-1819.
- [61] STRASS B, WAGNER G, CONRAD C, et al. Realization of Al/Mg-hybrid-joints by ultrasound supported friction stir welding-mechanical properties, microstructure and corrosion behavior[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 966-967: 521-535.
- [62] BENFER S, STRASS B, WAGNER G, et al. Manufacturing and corrosion properties of ultrasound supported friction stir welded Al/Mg-hybrid joints[J]. *Surface and Interface Analysis*, 2016, 48(8): 843-852.
- [63] THOMA M, WAGNER G, STRASS B, et al. Recent developments for ultrasonic-assisted friction stir welding: Joining, testing, corrosion: An overview[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, 118: 12014.
-
- 作者简介: 武传松(通信作者), 男, 1959 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为焊接物理、高效焊接工艺过程的数值模拟与测试控制。
E-mail: wucs@sdu.edu.cn