

引用格式: 石磊, 张贤昆, 李阳, 等. 钛/铝异种金属搅拌摩擦焊及其改型新工艺研究进展[J]. 材料工程, 2025, 53(6): 62-73.
SHI Lei, ZHANG Xiankun, LI Yang, et al. Research progress in friction stir welding of Ti/Al dissimilar metals and its modified new processes[J]. Journal of Materials Engineering, 2025, 53(6): 62-73.

钛/铝异种金属搅拌摩擦焊及其 改型新工艺研究进展

Research progress in friction stir welding of
Ti/Al dissimilar metals and its
modified new processes

石磊^{1*}, 张贤昆¹, 李阳¹, 武传松¹, 刘小超²

(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 东南大学 机械工程学院, 南京 211189)

SHI Lei^{1*}, ZHANG Xiankun¹, LI Yang¹,
WU Chuansong¹, LIU Xiaochao²

(1 Key Laboratory for Liquid-Solid Structural Evolution and
Processing of Materials (Ministry of Education), Shandong
University, Jinan 250061, China; 2 School of Mechanical
Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

摘要: 钛/铝异种焊接结构兼具钛合金的高强度、耐腐蚀性以及铝合金的轻质、易成型特性, 为产品设计和制造提供了更广阔的选择空间。同时, 该结构有助于降低构件质量和成本, 实现轻量化与结构-功能一体化。搅拌摩擦焊作为一种固相焊接方法, 是最适合于钛/铝异种连接的方法之一。然而, 在钛/铝常规搅拌摩擦焊接过程中, 仍存在搅拌针磨损严重、焊缝厚度方向性能不均匀、焊缝根部易出现未焊合缺陷、金属间化合物难以精准调控等问题。本文综述了国内外研究者针对上述问题提出的改进措施, 探索了多种新型工艺, 以期改善钛/铝常规搅拌摩擦焊的不足, 实现高质量连接。分析对比了不同改型工艺的特点与适用性, 主要包括界面添加中间层、施加辅助外场、改变接头形式以及采用静轴肩搅拌摩擦焊 4 种方法, 探讨其在提升焊接质量和优化界面性能方面的作用与机制, 并对钛/铝异种搅拌摩擦焊的未来发展方向进行了系统总结。最后指出, 未来的研究应进一步优化焊接改型新工艺, 同时提高工艺的稳定性 and 工业应用的可行性, 以推动钛/铝异种焊接结构的工程化应用。

关键词: 搅拌摩擦焊; 钛/铝异种金属; 改型搅拌摩擦焊; 连接机制; 金属间化合物; 力学性能

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2023.000844

中图分类号: TG44; TB31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2025)06-0062-12

Abstract: The Ti/Al dissimilar welded structure combines the high strength and corrosion resistance of titanium alloys with the lightweight and formability advantages of aluminum alloys, providing a broader range of options for product design and manufacturing. Meanwhile, this structure helps reduce component mass and cost, achieving lightweight design and structural-functional integration. Friction stir welding (FSW), as a solid-state welding method, is one of the most suitable techniques for Ti/Al dissimilar joining. However, conventional Ti/Al FSW still faces challenges such as severe tool wear, non-uniform mechanical properties along the weld thickness, potential lack of penetration at the weld root, and difficulty in precisely controlling intermetallic compounds (IMCs). This paper reviews the improvements proposed by researchers worldwide to address these issues, exploring various innovative processes to overcome the limitations of conventional Ti/Al FSW and achieve high-quality joints. It analyzes and compares the characteristics and applicability of different modified FSW techniques, including interlayer addition at the interface, application of auxiliary external fields, modification of joint configurations, and stationary

shoulder FSW. The study further explores their roles and mechanisms in enhancing weld quality and optimizing interface properties, while systematically summarizing future research directions for Ti/Al dissimilar FSW. Finally, it is pointed out that future research should focus on further optimizing modified welding processes, improving process stability, and enhancing industrial feasibility to promote the engineering application of Ti/Al dissimilar welded structures.

Key words: friction stir welding; Ti/Al dissimilar metal; modified friction stir welding; joining mechanism; intermetallic compound; mechanical property

铝合金和钛合金是航空航天和汽车工业中的轻质主力材料。钛合金具有高强、耐腐蚀、耐高温的优势,但是其加工性能差、加工成本高。相比之下,铝合金密度低、易成型、成本相对更低。钛/铝异种焊接结构的开发,能够实现二者材料的优势互补,减轻构件质量,降低成本,实现轻量化和结构-功能一体化,提升材料的应用潜力,在航空航天、国防军工、汽车制造等领域应用广泛,例如, YF-12 战斗机机翼、空客飞机座位导轨等结构均采用了钛/铝复合结构^[1-3]。随着我国航空航天、轨道交通等运载工具向大型化、整体化和轻量化的方向发展,钛/铝异种结构在我国新一代大推重比航空发动机和大推力液体运载火箭发动机等重大装备的关键构件中具有广泛的应用前景和迫切需求^[4]。

然而,钛和铝的熔点、热导率、线膨胀系数等热物理性质存在显著差异,采用传统熔焊进行焊接时,焊后残余应力大,焊接变形严重;同时界面附近容易发生冶金反应产生大量的脆性金属间化合物(intermetallic compounds, IMCs),服役过程中极易出现脆性断裂而造成接头失效,严重恶化接头性能。焊接过程中的气孔、夹杂、热裂纹等缺陷难以得到有效控制^[5]。由于激光焊接过程中很容易控制热输入,可以有效抑制钛/铝异种接头界面附近的脆性化合物反应层;但是,界面附近的 IMCs 仍然过厚,这使得接头的脆性极大,容易断裂于界面附近^[4,6]。可见,钛/铝异种焊接过程中的界面难以实现精准调控,实现钛/铝异种结构可靠焊接仍然是一个亟待解决的难题。

搅拌摩擦焊(friction stir welding, FSW)作为一种固相连接技术,相比于传统熔焊具有很多优势,其焊接过程中不仅能够避免合金元素烧损,还可以避免凝固和液化裂纹的产生,非常适合于铝合金、钛合金等有色金属的连接^[7]。由于 FSW 焊接过程中并不会超过金属的熔点,因此焊接峰值温度低、焊后变形和残余应力较小、IMCs 的生成较少;且自动化程度较高、接头质量好,非常适合于钛/铝异种金属的连接^[8-9]。但是,钛/铝异种金属 FSW 过程中存在大量的固有问

题,例如,焊缝根部缺乏穿透,容易在根部形成未焊合缺陷,合适的工艺参数窗口窄,IMCs 的精准调控困难。目前,国内外学者针对上述问题开展了大量的研究工作,本文基于相关研究进展,深入分析该领域的研究现状,对现有工艺改进进行针对性讨论和分析,并对未来的研究方向进行展望。

1 钛/铝异种金属的焊接性

实现高质量钛/铝异种金属的焊接,对于两种金属之间焊接性的了解是必不可少的。但是铝合金和钛合金在晶体结构、热物理性质上存在显著差异,使得钛/铝异种金属的焊接面临着巨大的挑战。如图 1^[6,10-11]所示,通过对钛/铝二元相图进行分析发现,钛熔点约为 1660 °C,而铝熔点为 660 °C,二者相差 1000 °C。因此采用传统熔焊进行焊接时,当钛合金熔化时,铝合金处于过热状态,从而在冷却过程中产生大量 Ti₃Al、TiAl、TiAl₂、TiAl₃ 金属间化合物,导致接头性能的恶化,过高的焊接温度也会导致焊接过程中出现合金元素烧损^[10]。而钛的热导率约为铝的 1/15,线膨胀系数约为铝的 1/3,焊接过程中钛/铝板材变形不协调,导致焊接后接头内部产生较大残余应力,从而引起焊后变形并容易导致裂纹的萌生^[2]。

同样这些特性也会影响钛/铝异种金属 FSW。FSW 过程中最主要的产热来源于轴肩与工件接触界面,由于钛合金的极低热导率,焊缝底部的温度明显低于顶部,导致底部材料难以受到充分驱动,因而可能产生未焊合缺陷^[12-14]。但是,FSW 过程中峰值温度低,产生少量 IMCs、接头热影响区小、接头成形好,因此相比于熔焊,FSW 仍然是钛/铝异种金属连接的首选。目前已有部分研究针对钛/铝 FSW 过程中 IMCs 的形成机理进行了解释。Li 等^[10]针对实验中发现界面附近不连续的 IMCs 形成机理进行了解释,其示意图如图 1(b)所示。在搅拌针的作用下,板材原始对接面附近的氧化膜首先被破坏,这使得钛和铝金属之间直接接触成为可能。FSW 过程中界面附近峰值温度可以达到 500 °C,但是这仍然不足以直接引发钛/铝之间的冶金反应。FSW 过程中剧烈的塑性变形导致界

面附近产生大量的晶体缺陷,例如位错,提供更多的扩散路径和能量增强钛/铝元素扩散,并形成IMCs。在较低焊速条件下,焊接热输入较高,产生了更厚的扩散层和更多的不连续IMCs。当焊速提高,热输入降低,扩散层厚度减小,IMCs数量减少。钛/铝异种金属FSW过程中IMCs的形成顺序为TiAl₃、TiAl、

Ti₃Al,其中TiAl₃的形成归因于其最低的自由能,而TiAl、Ti₃Al的形成则归因于Al从TiAl₃中发生的扩散行为,形成机理如图1(c)^[6]、(d)^[11]所示。随着搅拌针转速的提高,焊接过程中温度和应变均会增加,这也进一步促进了Al从TiAl₃中发生扩散,因此生成多层的IMCs。

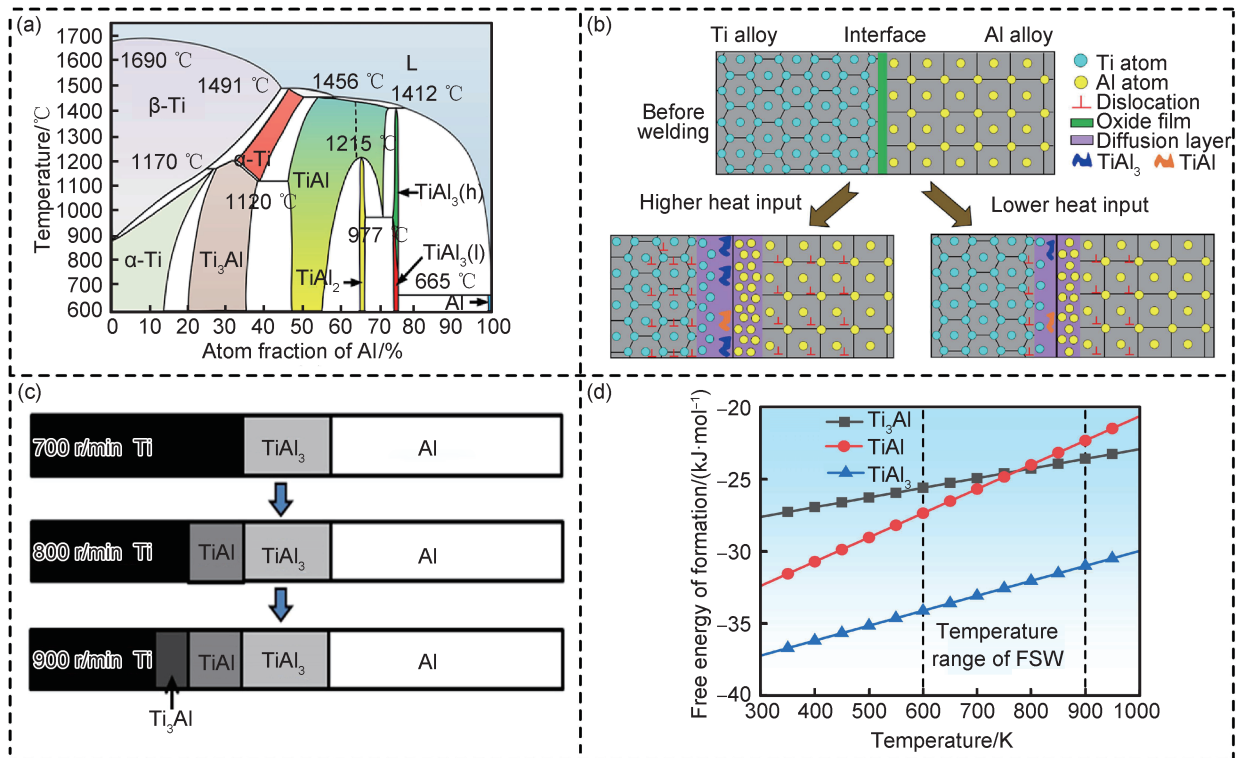


图1 钛/铝异种金属FSW过程中IMCs形成机理示意图

(a)Ti/Al二元相图^[10]; (b)不同热输入条件下界面IMCs形成机制^[10]; (c)不同转速条件下界面多层IMCs形成机制^[6];
(d)钛/铝体系中主要IMCs形成自由能^[11]

Fig. 1 Schematic diagram of IMCs formation mechanism in Ti/Al dissimilar metals FSW process

(a)Ti/Al binary phase diagram^[10]; (b)formation mechanism of interfacial IMCs under different heat input conditions^[10]; (c)formation mechanism of multilayer interfacial IMCs under different rotational speeds^[6]; (d)formation free energy of major IMCs in the Ti/Al system^[11]

虽然目前针对IMCs的生成与长大已有很多研究,但在钛/铝异种金属FSW过程中,大应变、高温、高应变速率条件下,相关的热-流-力耦合机制对IMCs生成的影响机理尚未得到深入探究。目前通过精准调控IMCs厚度以提高接头强度仍难以实现。

2 钛/铝异种金属常规FSW研究现状

鉴于FSW在钛/铝异种金属焊接方面的优势,国内外学者在钛/铝异种金属FSW工艺优化、接头微观组织分析与力学性能测试等方面进行了积极探索,并取得了一系列成果^[6]。钛/铝异种金属FSW主要连接方式分为对接和搭接,如图2所示。在对接连接方式

中,为了保护搅拌针,减少搅拌针磨损,钛/铝异种金属FSW过程中搅拌针大部分置于铝合金侧,仅有少量搅拌针与钛合金接触。在搭接连接方式中,由于钛合金FSW过程中的峰值温度高于铝合金熔点,因此搭接连接中采用铝上钛下的方式,避免铝合金熔化。在对接形式的Ti/Al异种金属FSW中,研究者已经达成共识,即将钛合金置于前进侧有助于优化焊接过程并提高接头质量。然而,在搭接形式中,钛合金放置于前进侧或者后退侧仍然存在争议,尚需进一步开展实验对钛/铝异种金属FSW搭接进行深入研究。根据Dressler等^[15]开展的TC4/2024-T3对接实验研究发现,在焊核区内能够看到明显的洋葱圈结构,并且热力影响区(thermo-mechanically affected zone, TMAZ)

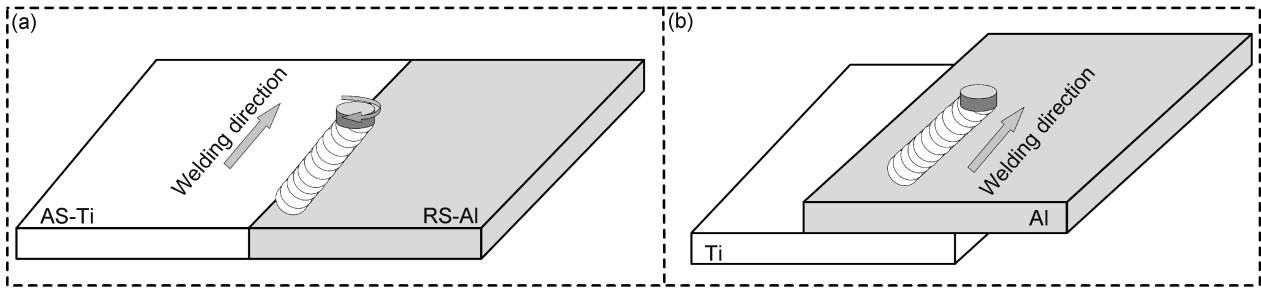


图 2 钛/铝异种金属 FSW 主要连接方式 (a)对接焊;(b)搭接焊

Fig. 2 Primary welding methods for Ti/Al dissimilar metal FSW (a)butt joint; (b)lap joint

和热影响区(heat affected zone, HAZ)只存在于后退侧的铝合金中。Kar 等^[16]和Sundar 等^[17]研究认为,FSW 过程中钛合金会出现绝热剪切带(adiabatic shear bands, ASBs),同时钛合金被搅拌头破碎,在界面附近产生 IMCs,有助于接头的连接,但是过厚的 IMCs 也会导致接头性能的下降。对钛/铝异种金属 FSW 焊缝进行二次焊接,能够细化钛颗粒和铝合金晶粒,也同样能够提升接头性能^[18]。相比于同质金属 FSW,钛/铝异种金属 FSW 除了常规的搅拌针转速、焊接速度、下压量、搅拌针倾角等常规参数,异种材料 FSW 过程中特有的偏移量、母材相对位置,也是决定钛/铝异种金属 FSW 接头性能的关键。

2.1 焊接工艺参数的影响

2.1.1 搅拌针转速的影响

Wu 等^[13]研究发现,当搅拌针转速过低时,焊接热输入和温度较低,钛/铝之间的挤压不足,易出现未焊合缺陷;而转速过高,则会在接头形成过厚的 IMCs,弱化接头性能。仅在合适的转速下,钛/铝界面结合良好,且形成薄的 IMCs 时,接头断裂于母材热影响区,其性能最优。Kar 等^[19-20]研究发现,合理提高搅拌针转速,焊接热输入增加,焊核区材料的塑性变形和机械混合作用更剧烈,更多细小的钛颗粒弥散分布于焊核区,可以提高接头性能。Sundar 等^[21]研究发现增加搅拌针转速,能够增加焊核区的变形程度,从而细化晶粒,强化接头。Ugurlu 等^[22]研究发现,搅拌针转速的增加,焊接过程中峰值温度明显升高,导致大量的钛颗粒被卷入至界面附近,形成大量的裂纹和孔洞缺陷,明显削弱了接头性能,较低转速更适用于钛/铝异种金属 FSW。在较高转速下,界面附近的钛合金会产生 ASBs,而 ASBs 附近容易产生裂纹,从而削弱接头性能^[23]。Choi 等^[6]研究发现,在较大的偏移量下,随着转速的增加,钛/铝异种接头界面处 IMCs 的厚度增加,并且转变为多层。

2.1.2 焊接速度的影响

Ugurlu 等^[22]针对 7075-T6 铝合金和 TC4 钛合金

进行实验,发现在较低转速下(660 r/min),随着焊速的增加,接头性能得到提升。结合测温发现,在保证足够的材料流动条件下,降低焊接峰值温度有利于减少 IMCs 的生成。Li 等^[10]研究发现,随着焊速的增加同时热输入降低,焊后变形程度会减小,同时较低焊速下,在焊缝顶部容易出现裂纹,但是焊速过高时,界面容易出现弱结合区域。Chen 等^[24]研究发现,过低焊速容易在界面出现大量 IMCs,从而导致界面附近的应力增大,产生裂纹。但是,同时在较高的转速和焊速下,界面附近的材料会产生严重的混合,反而容易产生更明显的孔洞缺陷^[25]。因此,焊速与转速的合理匹配是提升接头性能的关键,搅拌针转速提高后应同时适当提升焊速,以降低热输入,平衡界面反应。

2.1.3 搅拌针偏移量和相对位置的影响

在 FSW 过程中,焊缝前进侧具有较高温度,为更好地热塑化钛合金,一般将钛合金置于前进侧^[26]。搅拌针的偏移量(即搅拌针轴线偏离焊缝中心线的距离)不仅影响材料的流动混合,还决定热输入、IMCs 的形成和搅拌头的磨损^[26]。Rostami 等^[27]研究发现,当偏移量较大时,材料流动主要受到轴肩的作用,搅拌针作用相对较小,这容易导致焊缝根部出现未焊合缺陷。钛/铝异种金属 FSW 时,一般将搅拌头偏向较软的铝一侧。偏移量较大时,钛合金在搅拌针作用下少量破碎并随着搅拌针移动至后侧^[28-29]。同时大量研究表明,若偏移量较小(即搅拌针插入钛合金较多),既导致搅拌针严重磨损,引起过高的热输入,使接头内生成较厚的 IMCs,又会将大量的钛合金卷入焊核区,导致焊核区材料塑性流动性变差(钛熔点高、流变应力大),诱发孔洞和裂纹缺陷;而偏移量过大时又会使得热输入不足,界面冶金结合较少,弱化接头性能^[14,26,28,30]。

大量研究表明,合理控制热输入,钛与铝之间形成薄层 IMCs 是获得高质量钛/铝接头的关键因素之一^[6]。优化焊接工艺参数,改善塑性材料流动与混合,

促进焊核区形成旋涡状的钛/铝“微观机械连接结构”,是提升接头性能的主要方式^[15]。因此,优化焊接工艺参数,调控焊接热力耦合过程和塑性材料流动行为是获得性能优异的钛/铝异种接头的关键。此外,搅拌针形状和螺纹等特征也影响材料的流动与混合行为,而轴肩直径和搅拌针倾角则决定了焊接过程中的产热和材料流动特性。这些因素对钛/铝异种金属FSW焊缝的成形、接头的微观组织以及力学性能均具有重要影响。然而,目前对于这些因素在钛/铝异种金属FSW成形过程中作用的讨论仍不充分。

2.2 接头微观组织结构

在FSW过程中,由于其固有的大应变、高温、高应变率的特点,加工过程中会存在明显的微观组织演变,同时也会显著影响接头的力学性能^[31]。针对钛/铝异种金属的连接,界面往往是最为薄弱的区域,但是由于FSW产热大量集中于轴肩附近,接头底部温度较低,材料流动与界面冶金反应不足,导致接头上下部分界面不均匀的情况出现^[31-32]。因此,众多学者针对如何调控界面反应,展开了积极研究。

在较大应变速率和较高温度下,旋转的搅拌针会在变形的钛/铝合金中引入大量的位错,这为铝原子和钛原子在界面附近的相互扩散提供了有利条件^[31]。Liu等^[33]研究发现,在钛/铝界面附近生成的TiAl₃层核平均取向差(kernel average misorientation, KAM)比相邻的铝和钛均低,这表明金属间化合物中间层具有较低的位错密度,说明IMCs在生长过程中会吸收来自界面附近产生的位错和层间储存能,这也在一定程度上表明位错的管道扩散作用对于IMCs的生成至关重要。Pereira等^[34]在主轴功率控制模式下(0.5 kJ/mm),实现了对钛/铝界面处IMCs的有效控制,得到了纳米级的IMCs颗粒,这有利于异种金属FSW接头性能的改善。Zhao等^[35]研究发现,在较低温度下,钛/铝界面附近的TiAl₃是扩散形成的,但是随着温度升高,会在过饱和Al基体中析出TiAl₃和TiAl纳米颗粒。有研究表明^[10,24,36],界面过多的IMCs容易造成界面附近变形不协调,产生应力集中从而导致裂纹产生。Sundar等^[21]研究发现,钛/铝异种金属FSW过程中存在不连续动态再结晶和连续动态再结晶两种晶粒演化机制,这导致焊接区域硬度值的下降,同时晶界强化对钛/铝接头强度的贡献最大。由于界面附近存在绝热剪切带,导致钛/铝界面附近的钛合金存在明显的由动态回复主导的晶粒细化现象^[17]。

现有的大量研究已经实现了钛/铝异种金属FSW的高质量连接,能够为工业生产钛/铝异种焊接结构提供参考。但是,这些研究中,大多仅针对焊接参数

对接头成形和性能的影响,少量针对界面的微观结构进行了研究,而对于钛/铝异种金属FSW焊接过程的连接机制、IMCs生成机制及其调控方法并未提出创新性的意见。由于钛/铝FSW过程中,IMCs的种类和厚度与热输入密切相关,相对来说,较低热输入有利于接头性能的提升。在钛/铝FSW过程中,根据IMCs的形成机理,TiAl₃通常是最早生成的化合物。在热输入较低的情况下,TiAl₃是实验观察到的主要IMCs,且IMCs厚度适中。这种情况下,接头的性能往往相对较高。相比之下,TiAl和Ti₃Al的生成通常与过高的热输入相关,而过高的热输入会导致接头性能下降,因此不利于接头性能的提升。但是,界面最适宜的IMCs厚度,直至目前仍未达成共识。

2.3 钛/铝异种金属FSW数值模拟研究现状

目前应用于FSW过程的数值模拟研究方法,主要分为计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)方法和计算固体动力学(computational solid dynamics, CSM)方法^[37]。这两种方法均基于传统的网格进行计算,近年来光滑粒子法(smoothed particle hydrodynamics, SPH)也被引入FSW的模拟中^[38]。虽然该方法能够从根本上克服计算过程中网格畸变过大引起的计算困难,但是由于该技术采用了与传统模型完全不同的数值计算方法,算法不够完善,计算代价高。基于CSM理论的耦合欧拉-拉格朗日法(coupling Euler-Lagrangian method, CEL),该方法将工具视为刚体,而工件视为欧拉域,因此避免了传统拉格朗日网格因材料剧烈变形导致的网格畸变问题,可精准模拟搅拌头周围材料的动态行为及工件-搅拌头热力耦合效应,从而解决了FSW模拟过程中大变形带来的网格畸变过大而导致无法进行下一步计算的问题,适合于FSW的数值模拟^[39]。Buffa等^[40]采用CEL方法实现了对钛/铝异种金属FSW搭接的数值模拟,同时结合所得温度场和应变场,发现搭接过程中钛合金由 α 相转变为 $\alpha+\beta$ 相,使得钛合金硬度上升。但是,在对FSW进行模拟时,CEL方法时间步长较小,所需要的计算代价仍然较高,同时在处理复杂形状搅拌针时具有较大困难。CFD方法是一种基于欧拉描述的数值方法,网格不随材料变形,因此可以实现不同复杂几何形状搅拌头的数值模拟。Zhang等^[41]采用CFD方法对钛/铝异种金属FSW进行了模拟,该模型中将焊核区视为功能梯度材料,对焊核区的热物理性质进行了修正,实现了对钛/铝FSW过程温度场的模拟。但是该模型目前并未考虑倾角、搅拌针螺纹等因素对钛/铝FSW传热传质的影响。

相比于同质FSW和其他异质合金FSW数值模

拟,钛/铝异种金属FSW的模拟更具有挑战性。一方面,由于钛/铝异种金属FSW过程中钛合金主要以颗粒状形式存在于焊核区中,并且其尺寸明显小于网格尺寸,目前常用的网格法难以准确捕捉到钛颗粒的流动,需要采用其他更合理的方法捕捉。另一方面,钛/铝合金之间的热物理性质与流动应力差异较大,对于这些参数的计算方式仍然需要开发更多的创新方法,以实现更精准的钛/铝FSW材料流动行为捕捉。此外,钛/铝异种金属FSW过程中IMCs演变过程仍然需要通过借助数值模拟所得到的相关数据进行研究和分析,以实现最终精确调控IMCs厚度,提高接头强度。

3 钛/铝异种金属FSW新工艺改型

FSW在钛/铝异种焊接方面具有重要优势,但是常规FSW主要依靠搅拌头与工件的摩擦生热和塑性变形材料做功来软化金属,保证其具有足够的塑性流动性,避免产生焊接缺陷。在进行钛合金的常规FSW时,为了促进其塑性流动,通常需要较高的热输入来软化高熔点的钛合金。然而,这会导致界面处生成过厚的IMCs,从而对接头性能产生不利影响,限制了接头性能的进一步提升。此外,在钛/铝异种金属FSW过程中,促进材料流动与抑制界面反应之间存在固有矛盾,这使得能够获得优异接头性能的工艺参数范围非常有限。因此,对常规FSW进行工艺改型优化,以扩大钛/铝异种金属FSW焊接工艺窗口、提升接头性能和工艺稳定性,具有重要意义。

3.1 界面添加中间层

为了调控IMCs的生成,张鑫等^[42]在钛/铝对接面添加锌箔,研究了锌中间层对钛/铝异种金属FSW接头的影响,发现添加锌中间层能够抑制钛和铝之间生成脆硬的IMCs,提高接头性能。同样,Kar等^[43]在钛/铝对接面添加锌箔,由于锌的存在,AlZn基固溶体的生成限制了脆性 Al_3Ti 的形成。添加铌箔也得到了类似的结论,抑制了脆性IMCs的生成,降低了接头的脆性^[44]。Mustafa等^[25]在钛/铝对接面添加铜箔,结果表明,添加铜中间层能够有效减少界面 Al_3Ti 的形成,同时提高了接头强度。Huang等^[45]采用摩擦表面处理,首先在钛表面的待焊区摩擦沉积一层薄的铝合金,随后进行钛/铝异种金属搅拌摩擦搭接焊(friction stir lap welding, FSLW),发现摩擦沉积的铝合金,能够抑制钛/铝之间的过度冶金反应,获得了纳米尺度的 Al_3Ti 层,同时钛/铝之间形成了复杂的“微观机械连接结构”,最终接头断裂于铝母材。

3.2 施加辅助外场

辅助外场是调控钛/铝异种金属FSW接头组织及性能的重要方法之一。Patel等^[46]研究发现,采用随焊水冷技术能够抑制钛/铝FSW接头晶粒粗化和IMCs的生长,提高接头强度。而采用电弧预热能够促进材料的塑性流动与混合,提升接头韧性,但会导致IMCs增厚,反而降低了接头的力学性能^[46]。Bang等^[47]将电弧置于钛侧,研究了电弧预热对TC4钛合金与6061-T6铝合金FSW的影响,发现电弧预热可促进钛的软化,改善焊缝金属的塑性流动,使焊核区的钛颗粒更加细小且弥散,钛/铝之间形成了更多的“微观机械连接结构”,接头的抗拉强度和断裂韧性均有所提升。上述研究表明,在不同的焊接工艺参数下,预热的作用效果不同。当热输入较低时,预热能够促进焊缝金属的塑性流动,抑制焊接缺陷并形成更多的“微观机械连接结构”,从而提高接头性能。而在热输入较高时,预热会促进IMCs的生长,抵消材料流动带来的有益效果,不利于接头性能提升^[47]。

相对来说,超声作为一种机械能,可以有效降低塑性变形材料的流变抗力,增强材料塑性流动,并且不会引起明显的热效应。利用超声能量辅助常规FSW工艺,具有显著优势^[48-50]。为此,国内外大量学者研发了多种形式的超声辅助搅拌摩擦焊(ultrasonic assisted friction stir welding, UAFSW)新工艺,并开展了卓有成效的研究^[49-50]。主要包括3种施加方式,直接施加于搅拌头上,如图3(a)所示^[51];施加在搅拌头正前方的工件上部,如图3(b)所示^[52];施加在工件背部,如图3(c)所示^[53]。研究发现,施加超声能够在无明显热效应(甚至略微降低焊接峰值温度)的条件下,提高焊核区塑性材料流动,细化晶粒,提升接头性能^[54-55]。

目前超声辅助异种材料连接工艺探索方面,主要针对铝/镁这一熔点差异较小的异种合金体系,对于钛/铝这种熔点和强度差异较大的异种合金体系的研究相对较少^[51,56-57]。Yu等^[29,55,58]研究了施加超声能量对薄板钛/铝异种金属FSLW的影响,发现施加超声减缓了搅拌针的磨损,降低了峰值温度,增强了塑性材料流动和界面扩散,接头性能得到提升。毛镇东等^[59]研究了施加超声能量对钛/铝异种金属FSLW的影响,发现从钛合金一侧施加超声,能够抑制焊接缺陷,增加钛/铝扩散层厚度,提升接头性能。张贤昆等^[52]研究了4 mm厚钛/铝异种金属UAFSW工艺研究,结果证明施加超声后焊缝表面成型更为光滑,焊缝根部未焊合缺陷得到改善,接头抗拉强度提升到340 MPa。Ma等^[53,60]在钛合金背面施加超声,发现在

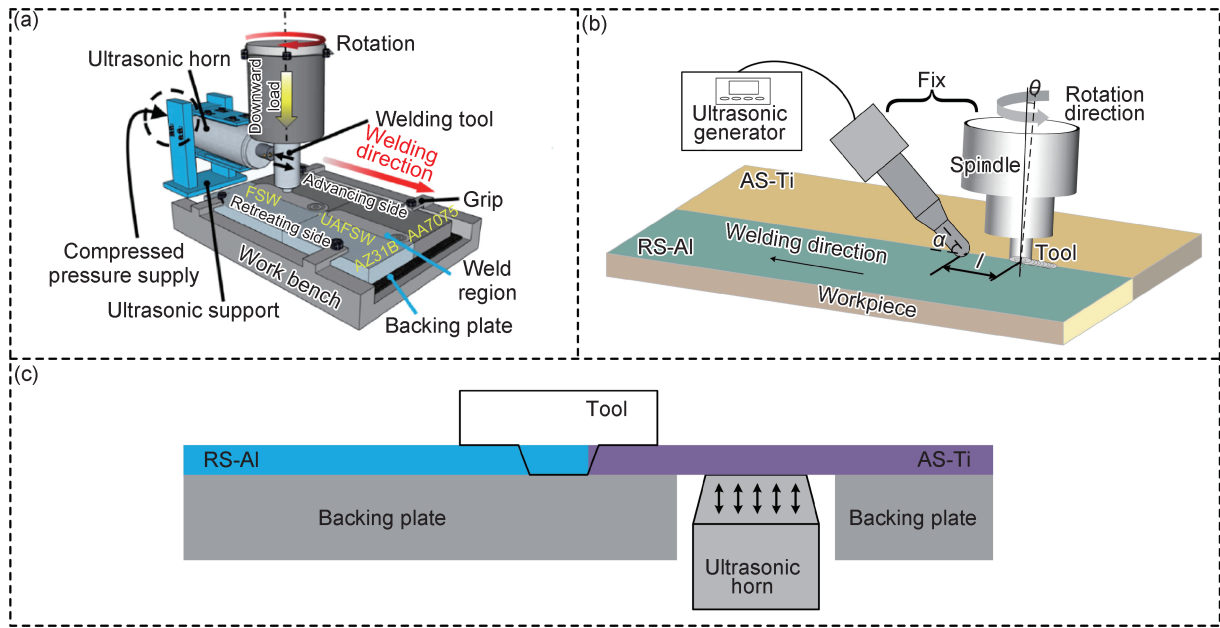


图3 不同形式的超声辅助搅拌摩擦焊接工艺示意图

(a)施加在搅拌头上^[51]; (b)施加在工件表面^[52]; (c)施加在工件背面^[53]

Fig. 3 Schematic diagrams of different forms of UAFSW processes

(a)applied to the FSW tool^[51]; (b)applied to the workpiece surface^[52]; (c)applied to the backside of the workpiece^[53]

较低热输入时,钛/铝界面为扩散型界面,未形成微米级厚度IMCs,施加超声后能够促进材料塑性流动和“微观机械连接结构”的形成,细化焊核区晶粒和钛合金颗粒,提升接头性能。上述研究证实钛/铝异种金属FSW过程中施加超声,能够改善焊缝成形,提升接头力学性能。

3.3 改变接头形式

目前关于钛/铝异种金属FSW的研究主要集中在探讨4 mm以下的薄板,对于中厚板钛/铝FSW的研究仍然较少,但是中厚板钛/铝异种焊接结构在一些承载构件中应用广泛,需要进一步研究实现高质量连接。由于钛合金的导热性能极差,随着板厚的增加,必然导致焊缝顶部和底部的温度差异过大^[41]。同时也需要采用更大的轴肩,而搅拌针端部产热不足,极易在焊缝底部出现孔洞和未焊合缺陷,严重影响接头的性能^[12]。有学者通过优化接头形式,改善焊接温度场和材料流动,以提高接头性能。张振华等^[61-62]对4 mm厚的铝合金与2 mm厚的钛合金进行“差高-偏置”焊接,采用L型接头,研究发现合理的接头设计能够改善热分布,调控接头IMCs形成,提高接头性能。Chen等^[24]研究表明,更小的轴肩更适合钛/铝异种金属FSW,有利于接头性能的提升。

为了实现中厚板钛/铝异种金属的高质量连接,Li等^[10,36]提出了双面钛/铝异种金属FSW(double-side friction stir welding, DS-FSW),即使用更小的搅拌针,

减小板厚方向上的温度差异,从而实现8 mm中厚板钛/铝异种金属的连接,抗拉强度最高达到265 MPa。Zhang等^[63]采用DS-FSW工艺,消除了钛/铝异种金属FSW过程中极易出现的根部未焊合问题,实现了4 mm厚钛/铝板的的全焊透,双面接头强度能够达到去除根部未焊接缺陷条件下的接头强度。同时,Li等^[64]基于DS-FSW对接头形式进行再次改型,使用Z型对-搭接界面,解决第二道焊接时再次装夹时容易造成第一道焊缝被压裂的问题,实现了更高质量的钛/铝异种金属FSW连接,平均抗拉强度超过300 MPa,工艺示意图如图4所示。

3.4 静轴肩搅拌摩擦焊

静轴肩搅拌摩擦焊(static shoulder friction stir welding, SSFSW),其轴肩在焊接过程中保持相对静止,能够减少轴肩界面与工件的摩擦产热和材料混合,从而降低焊核区内部的峰值温度,减少脆性IMCs的生成。SSFSW过程中材料流动较少,能够有效细化焊核区内部的晶粒,从而提高接头的极限抗拉强度和延展性。这些优势同样非常适合于钛/铝异种金属的连接。Sundar等^[21,65]采用SSFSW技术,对2 mm厚6061和TC4进行了研究,测温结果表明SSFSW能够明显降低焊接过程中的温度,距离搅拌针相同位置处,常规FSW峰值温度接近500 °C,SSFSW峰值温度约为300 °C,峰值温度的降低可以减少钛/铝之间的相互反应,抑制IMCs的生成。相比于常规FSW,

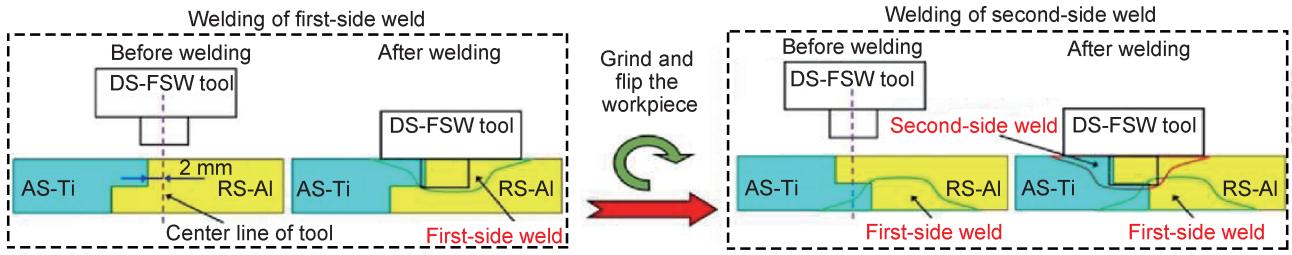


图 4 钛/铝异种金属双面 Z 型对-搭 FSW 工艺示意图^[64]

Fig. 4 Schematic diagrams of the double-sided Z-shaped butt-lap FSW process for Ti/Al dissimilar metals^[64]

SSFSW 接头性能得到明显提升,其抗拉强度达到 289 MPa,为 6061 母材抗拉强度的 88%^[21]。

3.5 新工艺研究现状总结

针对近年来文献所提到的新工艺中钛/铝 FSW 对接接头抗拉强度进行统计分析,如图 5 所示^[6,12-18,20-26,36,42-43,47,53,59-60,63-65]。接头系数参照铝合金母材抗拉强度进行比较。目前针对钛/铝 FSW 研究主要集中于 2024 和 6061 铝合金与 TC4 钛合金的连接,大部分研究中的板厚并未超过 4 mm。图 5(a)中浅绿色、浅灰色、浅蓝色区域分别是文献中 2024/TC4、6061/TC4、纯 Al/Ti 接头所报道最多的抗拉强度范围。2024/TC4 的接头强度明显高于 6061/TC4 接头,造成此现象的最主要原因是 2024 母材强度高于 6061,因此,提升高强度铝合金与钛合金接头的强度是提高钛/铝接头质量的关键方向之一。针对超过 4 mm 的

中厚板,实现高强度钛/铝接头连接的最优改型方式是 DS-FSW,8 mm 厚接头强度能够超过 300 MPa^[64]。UAFSW 在连接 2024/TC4、6061/TC4 时表现出了明显优势,相比于大部分常规 FSW,其能够提升接头强度^[52]。目前 SSFSW 应用于钛/铝连接的文献报道较少,该方法对接头强度的提升同样明显,未来可以针对其他合金进行实验^[65]。电弧辅助 FSW(arc assisted friction stir welding, AFSW)能够改善材料流动,降低工具磨损程度,但是该方法对于电弧的功率控制要求较高,工艺窗口较窄^[47]。目前针对界面添加中间层辅助 FSW(intermediate layer friction stir welding, IFSW)的研究大部分集中于纯 Al/Ti 接头,中间层在其他合金中的作用鲜有报道,更多潜在的机理还需要通过大量的实验进行研究。此外,在高强铝合金(例如 7×××系和 2×××系铝合金)与钛合金的连接

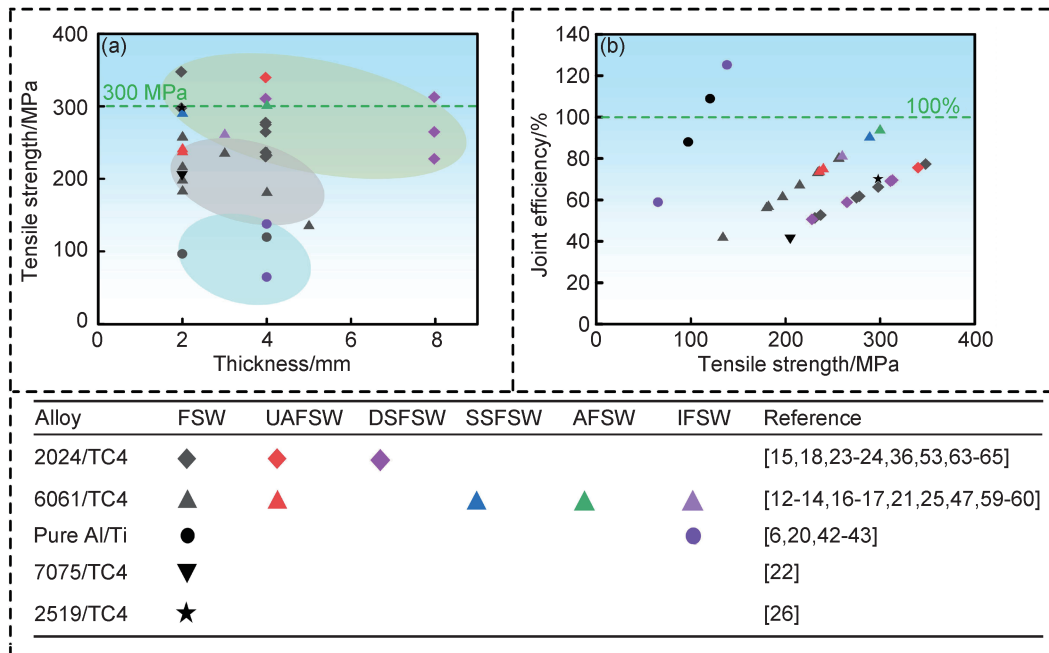


图 5 钛/铝异种金属 FSW 及其改型新工艺研究现状对比

(a) 比较不同厚度工件与接头力学性能; (b) 接头效率与力学性能分布

Fig. 5 Comparison of research status in FSW and its modified new process for Ti/Al dissimilar metals

(a) comparison of mechanical properties between workpieces with different thicknesses and their joints;

(b) distribution of joint efficiency and mechanical properties

中,接头力学性能仍然相对较低,接头系数大部分并未超过80%,难以满足实际的工程应用。

新工艺的提出为实现接头高质量连接提供了更多的途径,但其中潜在的机理并未被完全解释。虽然大多数研究认为添加中间层能够提升接头强度,改善界面附近的IMCs分布,但是更多的研究仅仅是集中于工艺实验的影响,并未从根本上解释添加中间层对界面冶金反应的影响。电弧预热能够改善材料流动,但是也同样会带来IMCs难以调控的问题。施加超声能够促进材料流动,细化晶粒,提升接头力学性能,但是超声和钛/铝异种金属FSW过程中特有的大应变场、高应变速率场、高温之间的耦合作用机理仍然不明确。施加超声功率大小、距离搅拌针位置远近、超声工具头放置于铝合金还是钛合金,这些问题仍然值得探讨,同时需要对超声辅助FSW工艺装备进行进一步优化和提升,以满足实际的工业生产应用。改变接头形式是通过改善IMCs分布从而提高接头强度的方式之一,更小尺寸的搅拌针能够带来更小的热输入,这对于调控IMCs厚度十分有利。但是,通过双面焊来实现中厚板钛/铝异种金属FSW的高质量连接,第二道焊接对第一道焊缝仍然会产生一定的影响。Z型对搭接头的提出一定程度上解决了该问题,工艺改型背后深层次的机理仍然需要进一步探讨,例如,对搭顺序对性能的影响、搭接面宽度的优化以及与搅拌针直径配合的最适合范围、接头形式改变后对残余应力缓释机制和焊接变形之间的关系等。

4 结束语

国内外学者针对钛/铝异种金属FSW进行了积极探索,通过优化工艺参数、在界面处添加中间层、施加外场辅助、改变接头形式和采用静轴肩搅拌摩擦焊等方式,消除了焊接缺陷并在一定程度上实现了界面IMCs的调控。研究表明,优化后的接头成形良好,内部无明显缺陷,接头强度可达到高强铝合金母材的70%以上。然而,目前的研究仍主要围绕工艺参数对接头性能和组织演变的影响展开,而对FSW过程的深层机制及其工业化应用仍存在诸多挑战。

首先,钛/铝FSW过程的连接机制尚不完全明确,尤其是界面IMCs的生成与长大机制仍缺乏系统研究。现有研究表明,FSW过程中界面处受到大应变率、高温和复杂应力场的影响,原子扩散和相互作用机制可能与传统熔焊方法不同。然而,目前的实验表征手段仍难以直接捕捉界面IMCs的动态演变过程。因此,未来研究应着重于开发更精准的原位表征技

术,例如,结合高分辨透射电子显微镜、原位同步辐射X射线衍射等方法,解析焊接界面的微观组织演化,以揭示钛/铝FSW的本质连接机制。此外,还可以借助分子动力学模拟和第一性原理计算,对界面原子扩散和IMCs生长过程进行定量分析,为焊接过程的优化提供理论指导。

其次,目前针对钛/铝异种金属FSW过程的数值模拟研究较为有限,现有模型在材料的高温塑性流变行为、界面反应动力学及焊接过程热-力-材料耦合效应的模拟上仍存在较大偏差。FSW过程中材料的协同塑性流变特性、界面处的微观组织演变及焊接过程中热输入与传热机理仍未被充分理解。因此,未来的研究应结合实验测试与多尺度模拟手段,例如,基于热-力-流耦合数值模拟、基于晶体塑性有限元的界面微观组织演化模拟以及基于相场法的IMCs生长模拟,建立更加符合实际的数值模型。这将有助于精确预测焊接过程中的界面组织演变,进而优化焊接参数,提高接头质量。

最后,现有的钛/铝FSW改型工艺多集中于实验室研究阶段,尚未实现大规模工业化应用。部分改进方法,如界面添加中间层、施加外场辅助、改变接头形式、静轴肩搅拌摩擦焊等,虽然在实验室条件下能够显著改善接头性能,但可能会增加工艺复杂度、提高生产成本,限制其在工业领域的推广。因此,未来研究应重点关注工艺的简化与优化,例如,探索更具工业适用性的辅助场调控方法,包括进一步优化超声辅助装置,提升超声利用效率,以提升焊接稳定性;进一步优化搅拌针材料与设计,提高工具耐磨性,降低生产成本。此外,结合自动化焊接技术,如机器人FSW系统,将优化工艺参数的智能化控制纳入焊接过程中,以实现钛/铝异种结构的高效、稳定制造。

综上所述,未来的研究方向应从微观连接机制的揭示、数值模拟精度的提升、改型工艺优化与应用推进等多个角度展开,以突破现有技术瓶颈,推动钛/铝异种金属FSW焊接结构的进一步工程化应用。

参考文献

- [1] 黄永宪,吕宗亮,万龙,等.钛/铝异质金属搅拌摩擦焊技术研究进展[J].航空学报,2018,39(11):6-17.
HUANG Y X, LYU Z L, WAN L, et al. Review of dissimilar friction stir welding between titanium and aluminum [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(11): 6-17.
- [2] 刘正涛,李忠盛,陈大军,等.钛/铝异种金属搅拌摩擦焊技术研究现状[J].兵器装备工程学报,2021,42(8):106-111.
LIU Z T, LI Z S, CHEN D J, et al. Research status of friction stir welding of Ti/Al dissimilar metals [J]. Journal of Ordnance

- Equipment Engineering, 2021, 42(8): 106-111.
- [3] 武传松, 吕学奇, 宿浩, 等. 铝-镁异质合金搅拌摩擦焊接成形的研究进展[J]. 机械工程学报, 2020, 56(6): 4-16.
WU C S, LÜ X Q, SU H, et al. Research progress in dissimilar friction stir welding of aluminium/magnesium alloys[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(6): 4-16.
- [4] 陈曦. 基于温度场和表面微结构调控的 TC4/6061 异种合金激光深熔钎焊接头强化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
CHEN X. Research on TC4/6061 dissimilar metals laser penetration welded-brazed joint strengthening based on temperature field and surface microstructural characteristics control [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [5] WANG T, LI X, ZHANG Y, et al. Regulating the interfacial morphology of electron beam welded pure Ti/2024Al dissimilar joint[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 245: 227-231.
- [6] CHOI J, LIU H, FUJII H. Dissimilar friction stir welding of pure Ti and pure Al[J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 730: 168-176.
- [7] 王瑞林, 杨新岐, 唐文坤, 等. 搅拌摩擦沉积增材 2219 铝合金组织及性能[J]. 航空材料学报, 2024, 44(1): 152-162.
WANG R L, YANG X Q, TANG W S, et al. Microstructure and properties of 2219 aluminum alloy fabricated *via* additive friction stir deposition[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2024, 44(1): 152-162.
- [8] GADAKH V S, BADHEKA V J, MULAY A S. Solid-state joining of aluminum to titanium: a review[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part L, 2021, 235(8): 1757-1799.
- [9] PADHY G K, WU C S, GAO S. Friction stir based welding and processing technologies-processes, parameters, microstructures and applications: a review [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2018, 34(1): 1-38.
- [10] LI Y, SHI L, WU C S, et al. Elucidation of welding speed on the microstructure and mechanical properties of medium-thick dissimilar Al/Ti double-side friction stir welded joint [J]. Materials Characterization, 2023, 200: 112910.
- [11] KATTNER U R, LIN J C, CHANG Y A. Thermodynamic assessment and calculation of the Ti-Al system [J]. Metallurgical Transactions A, 1992, 23(8): 2081-2090.
- [12] BANG K, LEE K, BANG H, et al. Interfacial microstructure and mechanical properties of dissimilar friction stir welds between 6061-T6 aluminum and Ti-6%Al-4%V alloys [J]. Materials Transactions, 2011, 52(5): 974-978.
- [13] WU A P, SONG Z H, NAKATA K, et al. Interface and properties of the friction stir welded joints of titanium alloy Ti6Al4V with aluminum alloy 6061 [J]. Materials & Design, 2015, 71: 85-92.
- [14] SONG Z H, NAKATA K, WU A P, et al. Influence of probe offset distance on interfacial microstructure and mechanical properties of friction stir butt welded joint of Ti6Al4V and A6061 dissimilar alloys[J]. Materials & Design, 2014, 57: 269-278.
- [15] DRESSLER U, BIALLAS G, MERCADO U A. Friction stir welding of titanium alloy TiAl6V4 to aluminium alloy AA2024-T3[J]. Materials Science and Engineering: A, 2009, 526(1/2): 113-117.
- [16] KAR A, KUMAR S, SINGH K. Mechanisms associated with material deformation, and microstructural evolution during friction stir welding of pure titanium and Al alloy [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2023, 28(8): 662-671.
- [17] SUNDAR S A, KUMAR A, MUGADA K K. Investigation of material flow, microstructure evolution, and texture development in dissimilar friction stir welding of Al6061 to Ti6Al4V[J]. Materials Today Communications, 2022, 33: 104424.
- [18] KAR A, SUWAS S, KAILAS S. Two-pass friction stir welding of aluminum alloy to titanium alloy: a simultaneous improvement in mechanical properties [J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 733: 199-210.
- [19] KAR A, MALOPHEYEV S, MIRONOV S, et al. A new method to elucidate fracture mechanism and microstructure evolution in titanium during dissimilar friction stir welding of aluminum and titanium [J]. Materials Characterization, 2021, 171: 110791.
- [20] KAR A, SUWAS S, KAILAS S V. Multi-length scale characterization of microstructure evolution and its consequence on mechanical properties in dissimilar friction stir welding of titanium to aluminum [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2019, 50(11): 5153-5173.
- [21] SUNDAR A S, MUGADA K, KUMAR A. Enhancing microstructural, textural, and mechanical properties of Al-Ti dissimilar joints *via* static shoulder friction stir welding [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2024, 146: 21004.
- [22] UGURLU M, CAKAN A. Dissimilar friction stir butt welding of AA7075-T6 Al and Ti6Al4V Ti plates: mechanical and metallurgical analysis [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 128(7/8): 3491-3506.
- [23] KAR A, SINGH K, KUMAR L. Effect of tool rotational speed and mechanisms associated with microstructure evolution and intermetallics formation in friction stir welding of aluminum alloy to titanium alloy [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2024, 33: 6748-6759.
- [24] CHEN Y, LI Y, SHI L, et al. Optimizing the shoulder diameter for double side friction stir welding of medium-thick TC4/AA2024 dissimilar alloys by Taguchi optimization technique [J]. Welding in the World, 2023, 67(8): 1887-1899.
- [25] MUSTAFA S E, RAI R N, FIROZ R. Enhancement of joint properties and reduction of intermetallics in FSW of highly dissimilar Al/Ti alloys [J]. Welding in the World, 2023, 67(6): 1393-1410.
- [26] ALI N, LONE N F, KHAN T, et al. A comparative study of effect of tool-offset position on defect dynamics and formation of intermetallic compounds in friction stir welding of Al-Ti dissimilar joints [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2024, 33: 13335-13350.
- [27] ROSTAMI H, NOUROUZI S, JAMSHIDI AVAL H. Analysis of welding parameters effects on microstructural and mechanical properties of Ti6Al4V and AA5052 dissimilar joint [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2018, 32(7): 3371-

- 3377.
- [28] KAR A, KAILAS S V, SUWAS S. Friction stir welding of aluminum to titanium: quest for optimum tool-offset, deformation of titanium, and mechanism of joint formation[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 128(5/6): 1943-1956.
- [29] YU M R, ZHAO H Y, XU F, et al. Influence of ultrasonic vibrations on the microstructure and mechanical properties of Al/Ti friction stir lap welds[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 282: 116676.
- [30] KAR A, SUWAS S, KAILAS S V. Significance of tool offset and copper interlayer during friction stir welding of aluminum to titanium[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 100(1/4): 435-443.
- [31] HEIDARZADEH A, MIRONOV S, KAIBYSHEV R, et al. Friction stir welding/processing of metals and alloys: a comprehensive review on microstructural evolution[J]. Progress in Materials Science, 2021, 117: 100752.
- [32] MENG X, HUANG Y, CAO J, et al. Recent progress on control strategies for inherent issues in friction stir welding[J]. Progress in Materials Science, 2021, 115: 100706.
- [33] LIU M, ZHANG C, MENG Z, et al. TiAl₃ nucleation mechanism and atomic-scale interface features in the Al/Ti composite structures [J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 226: 109331.
- [34] PEREIRA V F, FONSECA E B, COSTA A M S, et al. Nanocrystalline structural layer acts as interfacial bond in Ti/Al dissimilar joints produced by friction stir welding in power control mode [J]. Scripta Materialia, 2020, 174: 80-86.
- [35] ZHAO H, YU M, JIANG Z, et al. Interfacial microstructure and mechanical properties of Al/Ti dissimilar joints fabricated *via* friction stir welding[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 789: 139-149.
- [36] LI Y, SHI L, WU C S, et al. Achieving high property medium-thick Ti/Al dissimilar joints by double side friction stir welding [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2022, 27(8): 655-663.
- [37] 陈高强, 史清宇. 搅拌摩擦焊中材料流动行为数值模拟的研究进展[J]. 机械工程学报, 2015, 51(22): 11-21.
CHEN G Q, SHI Q Y. Recent advances in numerical simulation of material flow behavior during frictions stir welding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(22): 11-21.
- [38] MARODE R V, AWANG M, JANGA V S R. Computational modelling and comparative analysis of friction stir welding and stationary shoulder friction stir welding on AA6061 [J]. Crystals, 2023, 13(9): 1317.
- [39] GENG P, MORIMURA M, WU S, et al. Prediction of residual stresses within dissimilar Al/steel friction stir lap welds using an Eulerian-based modeling approach [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 79: 340-355.
- [40] BUFFA G, FRATINI L, SCHNEIDER M, et al. Micro and macro mechanical characterization of friction stir welded Ti-6Al-4V lap joints through experiments and numerical simulation [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(12): 2312-2322.
- [41] ZHANG X K, SHI L, WU C S, et al. Multi-phase modelling of heat and mass transfer during Ti/Al dissimilar friction stir welding process [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 94: 240-254.
- [42] 张鑫, 陈玉华, 王善林. 工艺参数对Ti/Zn/Al异种金属搅拌摩擦焊接头力学性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(1): 247-251.
ZHANG X, CHEN Y H, WANG S L. Effect of process parameters on mechanical properties of Ti/Zn/Al joint welded by friction stir welding [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46(1): 247-251.
- [43] KAR A, CHOUDHURY S K, SUWAS S, et al. Effect of niobium interlayer in dissimilar friction stir welding of aluminum to titanium[J]. Materials Characterization, 2018, 145: 402-412.
- [44] KAR A, KAILAS S V, SUWAS S. Effect of zinc interlayer in microstructure evolution and mechanical properties in dissimilar friction stir welding of aluminum to titanium[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2018, 27(11): 6016-6026.
- [45] HUANG Y X, LV Z L, WAN L, et al. A new method of hybrid friction stir welding assisted by friction surfacing for joining dissimilar Ti/Al alloy[J]. Materials Letters, 2017, 207: 172-175.
- [46] PATEL P, RANA H, BADHEKA V, et al. Effect of active heating and cooling on microstructure and mechanical properties of friction stir-welded dissimilar aluminium alloy and titanium butt joints[J]. Welding in the World, 2020, 64(2): 365-378.
- [47] BANG H S, BANG H S, SONG H J, et al. Joint properties of dissimilar Al6061-T6 aluminum alloy/Ti-6%Al-4%V titanium alloy by gas tungsten arc welding assisted hybrid friction stir welding[J]. Materials & Design, 2013, 51: 544-551.
- [48] 石磊, 戴翔, 武传松, 等. 2195铝锂合金超声振动辅助搅拌摩擦焊接工艺研究[J]. 材料工程, 2021, 49(5): 122-129.
SHI L, DAI X, WU C S, et al. Process investigation on ultrasonic vibration enhanced friction stir welding of 2195 aluminum-lithium alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2021, 49(5): 122-129.
- [49] 石磊, 肖亦辰, 武传松, 等. 铝合金超声辅助搅拌摩擦焊接工艺研究进展[J]. 航空制造技术, 2022, 65(8): 36-46.
SHI L, XIAO Y C, WU C S, et al. Research progress on ultrasonic assisted friction stir welding of aluminum alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(8): 36-46.
- [50] FAN Z, BAI K, CHEN C. The application of ultrasound in joining: principles, processes and properties[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 101: 269-299.
- [51] MUHAMMAD N A, GENG P, WU C, et al. Unravelling the ultrasonic effect on residual stress and microstructure in dissimilar ultrasonic-assisted friction stir welding of Al/Mg alloys[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2023, 186: 104004.
- [52] 张贤昆, 石磊, 武传松, 等. 铝/钛异种金属超声振动强化搅拌摩擦焊接工艺试验研究[J]. 航天制造技术, 2023(4): 7-11.
ZHANG X K, SHI L, WU C S, et al. Experimental study on ul-

- trasonic vibration enhanced friction stir welding of Al/Ti dissimilar joints[J]. *Aerospace Manufacturing Technology*, 2023(4): 7-11.
- [53] MA Z W, JIN Y Y, JI S D, et al. A general strategy for the reliable joining of Al/Ti dissimilar alloys *via* ultrasonic assisted friction stir welding[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2019, 35(1): 94-99.
- [54] GAO S, WU C S, PADHY G K, et al. Evaluation of local strain distribution in ultrasonic enhanced Al 6061-T6 friction stir weld nugget by EBSD analysis [J]. *Materials & Design*, 2016, 99: 135-144.
- [55] YU M R, ZHAO H Y, XU F, et al. Effect of rotational speed on microstructure and mechanical properties of Al-Ti friction stir welds with ultrasonic vibrations[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2023, 320: 118119.
- [56] ZHAO J J, WU C S, SHI L, et al. Evolution of microstructures and intermetallic compounds at bonding interface in friction stir welding of dissimilar Al/Mg alloys with/without ultrasonic assistance [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2023, 139: 31-46.
- [57] 井瑞, 谭茂举, 武传松, 等. 2A12/AZ31B 异质合金超声振动辅助搅拌摩擦焊核区晶粒组织[J]. *材料工程*, 2023, 51(12): 75-83.
JING R, TAN M J, WU C S, et al. Grain structure in ultrasonic vibration assisted friction stir weld nugget zones of 2A12/AZ31B dissimilar alloys[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2023, 51(12): 75-83.
- [58] 于明润. 铝/钛搭接超声辅助搅拌摩擦焊接头组织演变及强化机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
YU M R. Study on microstructure evolution and strengthen mechanism of Al/Ti ultrasonic assisted friction stir lap joints[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [59] 毛镇东, 吴双连, 刘雪松. 超声辅助铝/钛搅拌摩擦搭接接头的成形和组织[J]. *焊接学报*, 2019, 40(2): 145-148.
MAO Z D, WU S L, LIU X S. Formation and microstructure of ultrasonic-assisted friction stir lap welding dissimilar Al/Ti alloys [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2019, 40(2): 145-148.
- [60] MA Z, SUN X, JI S, et al. Influences of ultrasonic on friction stir welding of Al/Ti dissimilar alloys under different welding conditions[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 112(9/10): 2573-2582.
- [61] 张振华. 钛/铝异种金属复合接头搅拌摩擦焊工艺及连接机制[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
ZHANG Z H. Process and joining mechanism of dissimilar materials Ti/Al butted joint by friction stir welding[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
- [62] ZHANG Z H, LI B, FENG X M, et al. Friction-stir welding of titanium/aluminum dissimilar alloys: joint configuration design, as-welded interface characteristics and tensile properties[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B*, 2014, 228(11): 1469-1480.
- [63] ZHANG X K, WANG X, LI Y, et al. Eliminating root defect in Al/Ti dissimilar friction stir welded *via* the double-side process [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2023, 28(8): 803-809.
- [64] LI Y, SHI L, WU C S, et al. Enhancing the mechanical performance of medium-thick Ti/Al dissimilar joints by an innovative double side friction stir Z shape butt-lap welding process[J]. *Materials Today Communications*, 2023, 35: 106249.
- [65] SUNDAR A S, KUMAR A, MUGADA K K. Minimizing material flow in the dissimilar joining of Al6061 and Ti6Al4V to mitigate the adverse effects of intermetallic compounds[J]. *Materials Letters*, 2023, 350: 134956.

基金项目:国家自然科学基金项目(52275349, 52035005);山东省重点研发计划(重大科技创新工程)资助项目(2021ZLGX01)

收稿日期:2023-12-18; **录用日期:**2024-01-10

通讯作者:石磊(1987—),男,教授,博士生导师,从事搅拌摩擦焊接与增材制造研究,联系地址:山东省济南市经十路17923号山东大学材料科学与工程学院焊接研究所(250061),E-mail:lei.shi@sdu.edu.cn

(本文责编:寇凤梅)