

引文格式: 陈书锦, 张帅, 张荣洲, 等. 外部能场辅助搅拌摩擦焊接技术综述[J]. 航空制造技术, 2024, 67(10): 14-23.

CHEN Shujin, ZHANG Shuai, ZHANG Rongzhou, et al. Review of external energy field assisted friction stir welding[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(10): 14-23.

# 外部能场辅助搅拌摩擦焊接技术综述\*

陈书锦, 张帅, 张荣洲, 李志豪, 李沫琦, 刘建华

(江苏科技大学材料科学与工程学院, 镇江 212100)

[摘要] 外部能场辅助搅拌摩擦焊接是一种改进型固相焊接方法, 在航空航天、汽车制造、能源领域等方面得到了广泛应用, 通过引入外部能场, 可以改善焊接接头的组织和性能, 提高焊接质量和效率。本文对外部能场辅助搅拌摩擦焊接技术进行了分类, 综述了能场的选择和控制在工艺参数的优化等, 阐述了外部能场对焊接温度、轴向载荷、接头组织性能的影响, 最后总结了外部能场辅助搅拌摩擦焊接技术未来的发展趋势。

关键词: 搅拌摩擦焊接; 外部能场方法; 接头性能; 晶粒细化; 轴向载荷; 温度梯度

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2024.10.014



陈书锦

教授, 博士生导师, 研究方向为搅拌摩擦焊接。

搅拌摩擦焊(Friction stir welding, FSW)是通过搅拌工具的旋转和推进产生摩擦热和搅拌力, 使焊接材料发生塑性变形, 从而实现焊接接头的连接。此技术具有多种优势, 例如在

焊接过程中材料不会熔化和凝固, 焊核区的晶粒得到细化, 进而避免了气孔和夹杂物等缺陷<sup>[1]</sup>, 接头展现出良好的综合力学性能。FSW技术在航空航天、汽车制造、能源等对焊接接头质量和性能有严格要求的行业中得到了广泛应用。然而, FSW也存在一些挑战和问题: (1) 焊接过程中需要较大的轴向力, 导致焊接工装复杂、体积较大<sup>[2]</sup>; (2) 控制焊接能量的手段有限, 通常只能通过调整焊接速度、搅拌头的转速和下压力来改变热输入; (3) 除了摩擦力和搅拌热外, 直接干预焊接区域塑性金属流动的手段有限; (4) 搅拌头容易磨损, 特别是在低温状态下焊接时, 会加速搅拌头的磨损, 甚至可能导致搅拌头折断, 这使得铁基合金、钛合金等高熔点金属的焊接变得困难<sup>[3]</sup>; (5) 在进行异种金属的FSW时, 调控异质界面金属间化合物层是一个挑战。

为了克服这些挑战并充分发挥FSW的优势, 研究者们从工艺参数、搅拌头材料、搅拌头外形和施加外部

能场等多个角度进行了探索。这些改进措施各有优点和局限性。本文将重点关注外部能场辅助FSW, 热量辅助和超声振动的引入可以有效降低焊接过程中的轴向力和减小工装压力, 磁场的加入直接干预了焊接区域塑性金属流动。此外, 本文还总结了辅助能场的类型、作用机理以及不同焊接材料对接头性能的影响, 并对相关技术的发展趋势进行了展望。

## 1 外部热量辅助搅拌摩擦焊

在FSW过程中, 确保母材获得足够的热输入是至关重要的。这使得工件材料能够塑化, 从而确保材料在焊接过程中充分流动, 并形成优质的接头。特别对于某些高熔点或高硬度材料, 如果难以提供足够的热输入, 将导致轴向载荷过大、搅拌头磨损、焊缝飞边和孔洞等缺陷。为了解决这些问题, 外部热量辅助方法应运而生, 主要包括外部电阻辅热、电弧辅热、激光辅热、工件通电辅热和电磁感应辅热。

\* 基金项目: 国家自然科学基金(52275339)。

### 1.1 外部电阻辅热

外部电阻辅热是一种常见的热外部热量辅助焊接方式,作为一种有效的焊接辅助手段,能够优化焊接过程、提高接头质量并降低潜在的缺陷风险。该方式主要通过电阻丝加热带实现。一般将加热带放置在背板的凹槽中,形成加热平台。这有助于减小厚度方向的温度梯度,改善塑性金属的流动能力,从而减少孔洞等焊接缺陷的产生。当对同种金属进行焊接时,外部电阻辅热能够扩大焊核区的尺寸,进一步优化焊缝的成形。以 20 mm 厚的 2024-T4 铝合金轧制板材为例,对其进行预热至特定的温度区间(20~80℃),如图 1 所示<sup>[1]</sup>,焊核区的宽度、高度和面积均呈现先增大后减小的趋势;在 40℃ 的预热温度下,焊核区的尺寸达到最大,焊缝的成形质量最佳。但需要注意,过高的预热温度可能导致塑性金属向上部高温区迁移,进而产生疏松缺陷。对于 2.5 mm 厚的 Ti-6Al-4V 合金,采用背部加热工艺同样能够有效减小温度梯度和内部应力,不仅降低了接头底部出现撕裂缺陷的概率,还减少了搅拌头的磨损<sup>[2-3]</sup>。

异种金属 FSW 方面,在对 20 mm 厚的 5A06 铝合金和 AZ31B 镁合金焊接时,背部加热工艺在增加焊核区面积的同时,也会促进大量金属间化合物  $Al_{12}Mg_{17}$  和  $Al_3Mg_2$  脆硬性相生成,较常规 FSW,提高了焊缝接头的硬度,但拉伸强度有所降低<sup>[4]</sup>。

### 1.2 电弧辅热

电弧辅助搅拌摩擦焊(Arc assisted friction stir welding, AAFSW)运用等离子弧或 TIG 电弧装置来预热和软化待焊区材料,从而获得更佳的焊接效果<sup>[5]</sup>。在焊接 AM60/AZ31 镁合金板材的试验中,研究人员发现,在接头的抗拉强度和屈服强度不变的情况下,电弧引入后的接头延伸率提高了 57% 左右<sup>[6]</sup>。这一显著提升进一步证明了 AAFSW 在提高焊

接质量和性能方面的有效性。

AAFSW 作为辅助热源在异种金属的焊接中发挥了重要作用。它通过增加焊接热输入增强材料的塑性流动,有效提高了接头的强度和延伸率。对于铝/钢这种异种金属的连接,由于钢的硬度较高、流动性较差,传统的 FSW 难以达到理想焊接效果<sup>[7]</sup>。为了解决这一问题,研究人员采用电弧作为辅助热源。许惠

斌等<sup>[8]</sup>在 3 mm 厚的 2024 铝合金与 Q235 钢的 FSW 中,引入钨极氩弧焊作为辅助热源;试验结果如图 2 所示,随着电流的增加,金属间化合物层(IMCs)厚度并未因电弧的加入而明显变厚,接头的抗拉强度呈现先增大后减小的趋势;此外,部分钢与焊核区的铝形成了“钩连”结构,这增强了接头间的机械咬合力;当电流值为 60 A 时,接头的强度达到最

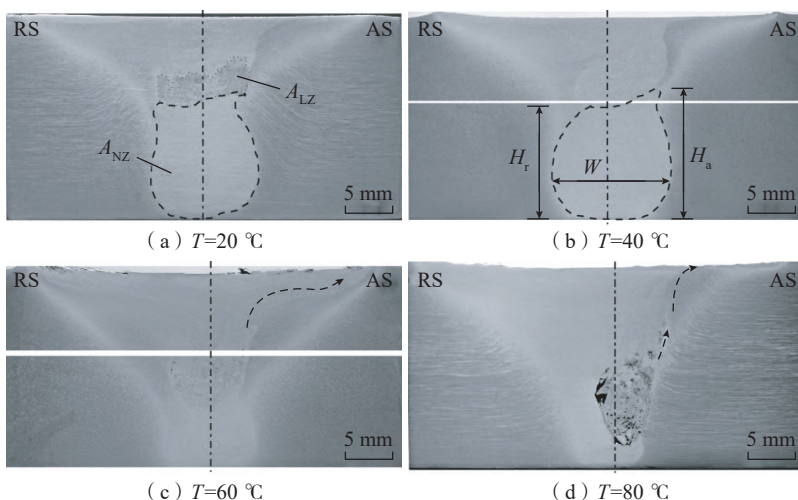


图 1 不同辅助加热温度条件下的焊缝横截面形貌<sup>[1]</sup>

Fig.1 Cross sections of welds produced at different assisted preheating temperatures<sup>[1]</sup>

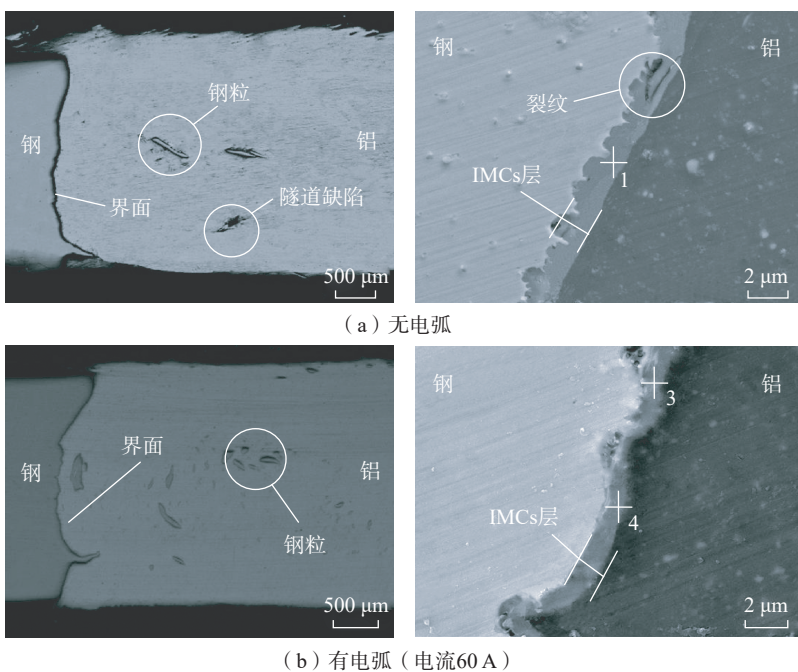


图 2 有与无电弧的接头界面宏观形貌和微观形貌<sup>[8]</sup>

Fig.2 Macroscopic and microscopic morphology of the joint interface with or without arc<sup>[8]</sup>

大值 301 MPa。

在另一项研究中, Bang 等<sup>[9]</sup>在焊接 3 mm 厚的铝合金(Al 6061-T6)和不锈钢(STS304)时,也采用了 TIG 电弧作为辅助热源。试验结果显示,电弧的加入增强了不同材料的塑性流动和部分退火效应,使焊缝的伸长率显著增加,再结晶晶粒尺寸略有减小。最终,接头的抗拉强度达到了母材的 93%,远高于传统的 FSW 焊缝的抗拉强度。

此外,根据焊缝两侧材料的熔点性能不同,还可以将电弧偏置进行不对称加热,进一步优化焊接效果,提高接头的质量和性能。

### 1.3 激光辅助

激光辅助搅拌摩擦焊(Laser-assisted FSW, LAFSW)利用激光能量对母材或搅拌头进行局部预热,如图 3 所示<sup>[10]</sup>,通过提前软化母材和预热搅拌头,增加了整体热输入,有助于降低轴向力和减少搅拌头的磨损。此外, LAFSW 还能细化晶粒、减小应力和孔洞缺陷,显著提高焊接质量。相比传统的 FSW,激光辅助技术提供了更高的灵活性和精确度,能够更好地控制热输入和焊接过程。这种技术适用于各种材料和复杂结构的焊接。

Campanelli 等<sup>[11]</sup>运用 LAFSW 对 5754H111 铝合金板进行焊接。通过对比分析,发现采用 LAFSW 技术焊接的铝合金板焊缝处晶粒更加细小,纵向残余应力降低了约 40 MPa,显著改善了铝合金的焊接性能。

在学者们的努力下, LAFSW 研究取得了更多成果。有研究发现,作用在工件上的激光能量的预热效果,对于位置存在明显的依赖性。在焊接厚度为 2 mm 的中碳钢(S55C)板时,激光施加在工件的后退侧,能明显减少缺陷形成;激光照射在工件的前进侧,可有效降低搅拌头的旋转扭矩<sup>[12]</sup>。对于异种金属,激光偏移距离直接影响焊缝成形,距离不足和过大都会导致表面空隙缺陷和

IMCs 层厚度的改变。Fei 等<sup>[13]</sup>在焊接 6061-T6 铝合金和纯铜时,发现激光辅助有助于减少金属间化合物的形成,激光偏移距离为 2 mm 时, IMCs 层厚度被控制在约 1  $\mu\text{m}$ ,减少了刀具磨损,增强关节抗拉强度。

当激光能量作用于搅拌头上时,可以迅速预热搅拌头。这种预热能量随后传递到焊缝区域,使焊缝温度迅速升高。许辉等<sup>[14]</sup>在对 6061-T6 铝合金进行焊接时,采用了激光同轴复合搅拌摩擦焊技术;试验结果显示,这种方法显著提高了焊缝金属的软化程度,但并未改变焊缝横截面组织的分布。

LAFSW 在铝合金、钢等异种金属的焊接中展现了巨大的潜力,但仍需进一步研究与优化。针对不同材料,需要仔细探究激光功率、加热位置与各种焊接参数之间的最佳配合关系。此外,解决被焊板材的反光问题及降低能源浪费也是未来研究的重要方向。

### 1.4 工件通电辅助

工件通电辅助搅拌摩擦焊(Electrically assisted friction stir welding, EAFSW)利用高强度电流引起工件软化,如图 4 所示<sup>[15]</sup>,这种方法常用于异种金属的焊接,因为它能够克服传统 FSW 中轴向力过大、材料塑性流动不足等问题。在工件表面施加连续的直流电(DC)或交流电(AC),通过电塑性效应和焦耳加热的协同效应,有助于改善内部组织<sup>[15]</sup>。这不仅能提高焊接效率,还能使接头具有更接近基材的硬度值,并有效抑制脆性金属间化合物的生成。Chowdhury 等<sup>[16]</sup>发现,以直流电作为二次热源时,热输入效果更好,焊接效率更高。这意味着直流电在焊接过程中能提供更稳定和高效的热输入,从而提高焊接质量和效率。

Liu 等<sup>[15]</sup>设计了一种电辅助加热搅拌摩擦焊系统,对 1.4 mm 厚的 Al 6061 与 TRIP 780 钢进行焊接;这

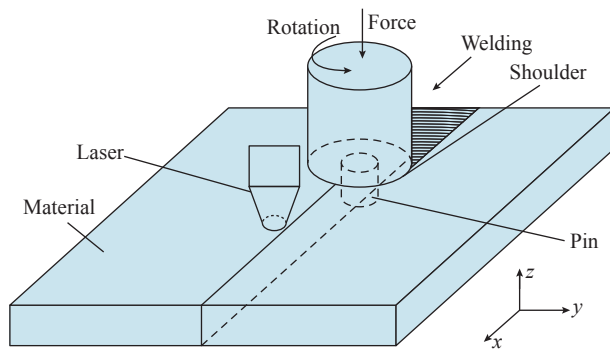


图 3 激光辅助加热 FSW 原理<sup>[10]</sup>  
Fig.3 Schematic of laser-assisted FSW<sup>[10]</sup>

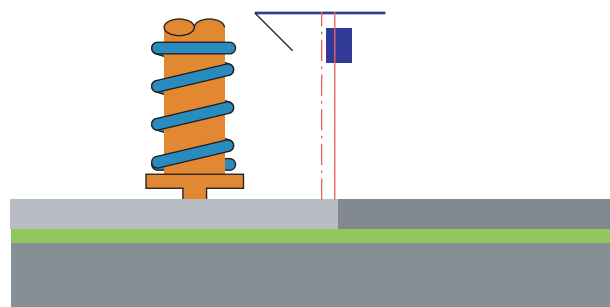


图 4 通电辅助 FSW 示意图<sup>[15]</sup>  
Fig.4 Schematic of electrically assisted FSW<sup>[15]</sup>

一系统的特点是,不使用搅拌头作为电极,而是通过给工件通入高达 560 A 的连续直流电来进行焊接;试验结果显示,EAFSW 显著减小了轴向焊接力,并增强了 Al-Fe 界面处薄层金属间化合物和微互锁特征的形成;这种工艺有效抑制了脆性 IMCs 中裂纹的产生和扩展,从而提高了焊接区的硬度值;当使用直流电搭接 Al 6061 到 TRIP 钢时,发现在前进侧的 Al-Fe 界面上形成了厚度小于 1 μm 的 FeAl 或 Fe<sub>3</sub>Al 的 IMCs;这一发现表明,通过电辅助加热,可以有效减小 IMCs 的厚度,从而提高接头搭接的剪切强度。然而,Shaffer 等<sup>[17]</sup>采用电流密度为 10 A/mm<sup>2</sup> 的 DC 电流焊接 Al 6061-T651 与低碳钢时,发现 EAFSW 只改善了组成材料之间的材料流动,并未提高接头强度。

直流电流的大小对于接头力学性能也有一定的影响。Chen 等<sup>[18]</sup>在 6 mm 厚 2219 铝合金母材上施加了 0~600 A 的直流电,发现随着电流的增加,温度上升,热输入更加充分,铝合金的流动性有所增加,使接头面积增大;同时,细化了沉淀物 Al<sub>2</sub>Cu,使其分布更加均匀,焊区的整体硬度、抗拉强度得到显著提高,如图 5 所示。但是,对于高强度异种材料的连接,随着电流的增加,电阻热增大,接头硬度值略有降低<sup>[19]</sup>。

EAFSW 为异种金属的焊接提供了一种有效的解决方案,特别是对于需要高效率和高硬度的应用场景,利用工件自身的电阻效应来改善塑性流动,相对于外部电阻辅热,效果更佳。但是,该技术只能运用在导电材料的 FSW 中,试验过程中通电的安全问题也需要注意。未来的研究可以进一步探索该技术在更多材料和复杂结构上的应用潜力。

### 1.5 电磁感应辅热

电磁感应加热辅助搅拌摩擦焊 (Induction heating assisted friction stir welding, IHAFSW) 是一种利用电磁

感应原理对待焊材料进行加热,达到软化材料、降低材料流变抗力的焊接方法<sup>[5]</sup>。如图 6 所示<sup>[20]</sup>,当电流流经感应器线圈时会产生磁场,该磁场会使导电材料感应出涡流,这种电子流动会在工件上产生大量热,从而达到加热工件的目的<sup>[21]</sup>。

具体来说,局部感应加热在焊接过程中发挥的作用表现在以下 3 点。(1)降低塑性变形阻力。通过感应加热,材料得以软化并易于塑性变形,从而减小了轴向力。(2)细化晶粒。感应加热能够促进材料的动态再结晶,生成更加细小的等轴晶粒。(3)提高接头强度。由于降低了轴向力和摩擦热,金属间碳化物颗粒的尺寸增加,从而提高了焊缝强度。

Raj 等<sup>[22]</sup>在焊接 3 mm 厚的 Inconel718 合金时发现,较常规 FSW, IHAFSW 下搅拌区的硬度从 250HV 提高到 370HV,接头极限抗拉强度

达到了母材的 98.8%。这表明感应加热在提高焊缝强度方面发挥了重要作用。然而在对 8 mm 厚 2219 铝合金板材进行焊接时,虽然感应加热有效降低了纵向残余应力峰值,并促使焊核区晶粒实现动态再结晶,但接头微观组织和力学性能的变化并不明显<sup>[23]</sup>。这表明感应加热对不同材料的影响有所区别。对于异种金属,感应加热还可以起到提高接头拉伸率的作用。在焊接 AA5052 铝合金与 X12Cr13 不锈钢时,由于金属发生了部分退火,感应加热有效提高了焊缝区的塑性流动,增长了焊缝区域,增强接头延展性,还获得了结构更加精细的重结晶晶粒<sup>[20]</sup>。Kaushik 等<sup>[24]</sup>在焊接工业纯铝和低碳钢时,利用铝的非磁性,选择性感应加热钢板,发现焊缝区域没有明显的金属间层,接头的延伸率提高了约 34%;但是由于总体热量增加,引起 Al 基质

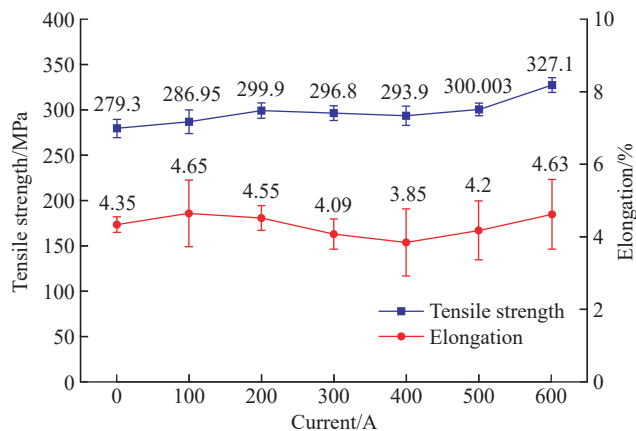


图 5 0-600 A 下 FSW 接头的拉伸性能<sup>[18]</sup>  
Fig.5 Tensile properties of FSW joints at 0-600 A<sup>[18]</sup>

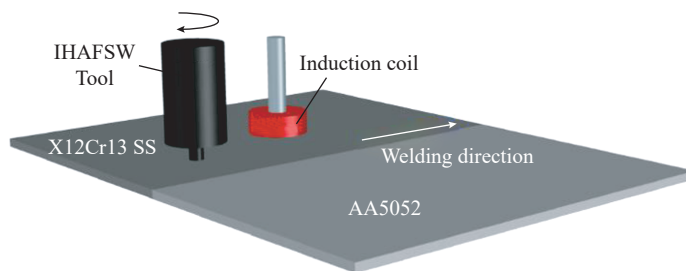


图 6 感应加热 FSW 示意图<sup>[20]</sup>  
Fig.6 Schematic diagram of IHAFSW<sup>[20]</sup>

软化,降低了接头强度。Mohan 等<sup>[20]</sup>也发现 IHAFSW 会引起铝/钢接头显微硬度和抗拉强度降低。

IHAFSW 通过降低塑性变形阻力、细化晶粒和提高接头强度等方式优化了焊接过程。然而,对于不同的材料及其厚度的差异,效果会有所不同,并且在实际焊接过程中能量利用率较低,只用于加热工件,并没有充分发挥出磁场的优势。在实际应用中,需要根据具体的材料和工艺要求进行优化和调整。

外部热量辅助搅拌摩擦焊,是在焊接过程中通过增加热输入来提高性能。对于某些材料来说,此种方式会因双重热效应不可避免地削弱接头性能,并且在实际的工业应用中需要考虑效益与成本(试验装置搭建、能量的利用率等)。所以在选择外部热量辅助方式时,需要考量不同的焊接需求和材料特性,如表 1 所示。

## 2 冷场辅助搅拌摩擦焊

当焊缝的热输入过高时,会导致接头冷却速度降低,进而产生较宽的热影响区,并恶化接头的力学性能。适当降低焊接热输入并提高冷却速度,可消除搅拌区的微孔缺陷、减小热影响区的宽度,有助于获得具有良

好力学性能的焊接接头。根据不同的冷源,冷场辅助的方式可以分为 3 种:水冷/水雾冷却(WF-FSW)、液态 CO<sub>2</sub>/液氮冷却(CF-FSW)和空气强制冷却(AF-FSW)。

冷场辅助法是 FSW 中增强接头性能的关键技术。通过提高搅拌区的冷却速度,有效抑制“焊后退火”现象产生,减少了热循环导致的接头软化效应<sup>[25]</sup>。此技术利于细化晶粒、优化焊缝表面成形,并全面提升接头的性能,为焊接工艺的进一步发展和优化提供了有力支持。汪虎等<sup>[26]</sup>研究了不同冷却介质条件下 7075 铝合金的 FSW 接头组织和性能,发现在水下焊接 3 mm 厚的 7075 铝合金板材时,热影响区明显较窄,焊缝表面质量更优,焊核区和热影响区的晶粒更为细小。此外,液态 CO<sub>2</sub>/液氮作为冷却剂展现出卓越的冷却能力,能在相同时间内带走更多热量。在液态 CO<sub>2</sub> 冷却条件下,对 4 mm 厚的 7075-T6 态铝合金板进行焊接,显著提高了冷却速率,有效避免了“焊后退火”,降低了焊缝各区域的温度,并获得更细的晶粒<sup>[27]</sup>,同时接头的强度、硬度和塑性都得到提升。许楠等<sup>[28]</sup>采用液氮冷却方法对 2 mm 厚的 H70 黄铜进行焊接时,发现液氮冷却有效抑

制了由焊后余热带来的退火软化,搅拌区的抗拉强度较母材提高了 58%。

对于异种金属焊接,较高的冷却速率会抑制晶粒生长,提升接头的力学性能,提高焊接效率,减小 IMCs 厚度。相较于传统 FSW,在水下焊接 6 mm 厚的 AA6061 铝合金和 AZ31B 镁合金时,生成的 IMC 更少,接头的抗拉强度由 128 MPa 提升至 182 MPa,接合效率由 51% 提升至 73%,但因为生成的部分 IMC,导致接头的伸长率降低<sup>[29]</sup>。在液态 CO<sub>2</sub> 冷却辅助下,进行 AA6065 合金和铜搭接,冷却介质吸收并带走了焊接区多余的热量,有效降低了焊接过程中达到的峰值温度<sup>[30]</sup>。

不同的冷却介质的冷却能力不一样,使得接头性能、晶粒大小、IMCs 厚度也有所区别,如表 2 所示<sup>[31]</sup>。在焊接 AA3003 铝合金和 A441 AISI 钢金属板时,采用液态 CO<sub>2</sub>、强制水和强制空气 3 种不同的冷却介质与传统 FSW 进行比较,发现液态 CO<sub>2</sub> 冷却速率最高,接头具有最高的硬度,晶粒尺寸最小,IMCs 层厚度最小。较低的冷却速率会引起 IMCs 增厚,得到更多的脆性,WF-FSW 的 IMCs 厚度最佳,样品具有最佳的强度。

表 1 不同外部热量辅助方式优缺点及工件特点

Table 1 Advantages and disadvantages of different external heat-assisted methods and the characteristics of workpiece

外部热量辅助方式	优势	应用材料及特点	独特优势	缺点
外部电阻辅助		适用于厚板连接; 20 mm 厚的 2024-T4 铝合金、20 mm 厚的 5A06 铝合金和 AZ31B 镁合金等	装置简单; 减小厚度方向的温度梯度,改善底部缺陷	热量通过接触传递,受热不均匀; 焊接区域有限
激光辅助	减小温度梯度; 改善塑性金属的流动能力; 减少孔洞等焊接缺陷; 细化晶粒; 提升接头性能	5754H111 铝合金板、2 mm 厚的中碳钢(S55C)板、6061-T6 铝合金和纯铜、6061-T6 铝合金等	激光具有更高的灵活性和精确度,能够更好地控制热输入	材料反光,激光利用率不高
电弧辅助		适用于铝钢连接; 3 mm 厚的 2024 铝合金与 Q235 钢、3 mm 厚的铝合金(Al6061-T6)和不锈钢(STS304)等	可以显著提升材料的延伸率; 电弧偏置可随时进行不对称加热	在异种材料 FSW 中,引起 IMC 层增厚
工件通电辅助		适用于异种金属连接; 1.4 mm 厚的 Al 6061 与 TRIP 780 钢、Al 6061-T651 与低碳钢等	DC 作用下焊接效率更高; 有效减小 IMC 层厚度	不适用于非导电材料; 试验装置搭建复杂
电磁感应辅助		3 mm 厚的 Inconel718 合金、8 mm 厚 2219 铝合金板、AA5052 铝合金与 X12Cr13 不锈钢、工业纯铝和低碳钢	显著提升接头的延展性	电磁能量利用率低; 不适用于非导电材料

### 3 超声辅助搅拌摩擦焊

超声辅助搅拌摩擦焊(Ultrasonic assisted friction stir welding, UAFSW)利用超声振动为金属微粒提供能量,产生高频振动,从而加剧金属微粒的热运动。这种方法显著减小了金属的变形阻力,有助于解决传统FSW中遇到的焊接载荷大、搅拌头易磨损、焊接效率低和接头质量差等问题。在较低的温度下,UAFSW能够为被焊工件提供足够的热输入,促使材料塑化并充分混合,形成高质量的接头。因此,UAFSW展现出巨大的应用潜力。

近年来,众多学者致力于研发各种新型的超声振动复合搅拌摩擦焊接工艺,通过各种方式将超声振动有效地施加到焊接过程中。根据超声振动能量的施加位置,超声辅助可分为将超声振动施加于搅拌头和施加于工件两种方式。

#### 3.1 超声能量施加于搅拌头

超声振动施加在搅拌头上方向不同所产生的效果也不相同,振动能量可横向作用于搅拌头,也可轴向作用于搅拌头。

##### 3.1.1 超声振动横向作用于搅拌头

超声能量通过轴承滚珠作用于搅拌头,再由搅拌头传递至工件的焊接区域,如图7所示<sup>[32]</sup>。在焊接过程中,搅拌头一边高速旋转,一边沿垂直焊接方向振动。

这种振动和旋转的复合作用,有助于细化晶粒、减小轴向载荷,并促进材料流动,从而提高焊接质量和效率。Park<sup>[33]</sup>首次实现了UAFSW,以横向施加超声振动的方法对6061铝合金板进行对接,施加超声后,轴向载荷明显降低,材料流动更加剧烈,搅拌头后方的空腔被有效填充。这表明超声振动在FSW中起到了关键作用,能够显著改善焊接效果。对于异种金属的焊接,例如3 mm厚的2A12铝合金和AZ31B镁合金,超声振动的作用更加明显;超声振动促

进了晶粒的再结晶,使焊核区晶粒尺寸明显细化;特别是在铝侧的中下部和镁侧的底部,晶粒细化效果更加显著;然而,由于镁合金晶粒发生了更加完全的再结晶行为,减弱了晶粒的取向性,导致镁侧不同区域的织构强度都有所降低<sup>[32]</sup>。尽管如此,超声振动仍然为异种金属的焊接提供了有效的解决方案。

当然,这种方法也存在一定局限

性。在焊接过程中,横向的高频振动容易使搅拌头疲劳受损,寿命缩短,超声能量在传递过程中也会使能量沿轴向比较严重地施加在搅拌头上,导致高频振动与搅拌摩擦的复合损失,且能量不能直接传递到焊缝,对底部未焊透缺陷改善并不明显<sup>[5,34]</sup>。

##### 3.1.2 超声振动轴向作用于搅拌头

超声振动沿轴向作用,可强化焊缝中下部金属的流变能力,如图8

表2 不同冷却条件下AA3003铝合金和A441 AISI钢的焊接参数对比<sup>[31]</sup>

Table 2 Comparison of welding parameters of AA3003 aluminum alloy and A441 AISI steel under different cooling conditions<sup>[31]</sup>

焊接方式	冷却介质	Al侧峰值温度/°C	IMCs层数	IMC层厚度/μm	表面流动环径/mm
冷场辅助FSW	液态CO <sub>2</sub>	430	1	2.1	2.2
	水/水雾	480	2	3.0	2.0
	强制空气	500	3	3.6	1.7
常规FSW	—	505	3	4.0	1.3

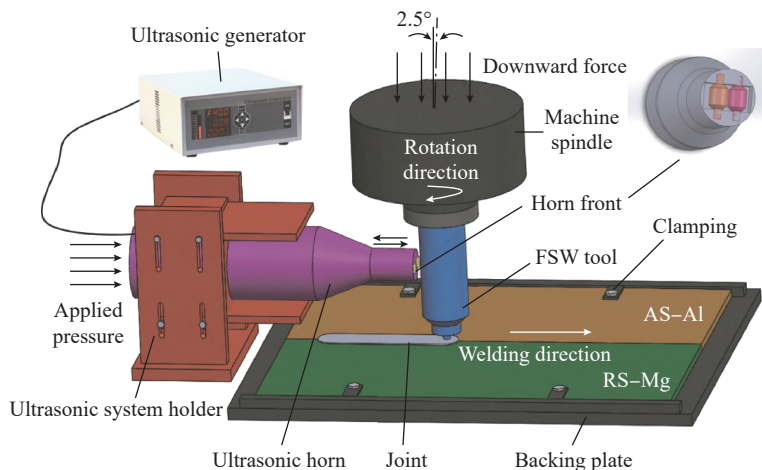


图7 超声横向施加于搅拌头<sup>[32]</sup>

Fig.7 Ultrasonic is applied to the stirring head along the horizontal direction<sup>[32]</sup>

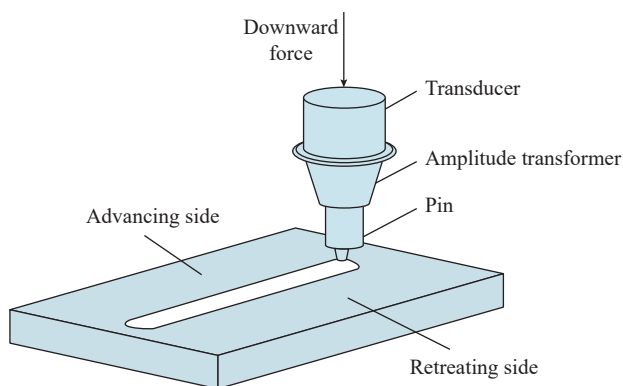


图8 超声沿着轴向施加于搅拌头<sup>[35]</sup>

Fig.8 Ultrasonic is applied to the stirring head along the axis<sup>[35]</sup>

所示<sup>[35]</sup>。这种方式可以有效改善焊缝底部的缺陷,降低纵向残余应力,并提升接头的性能。此外,超声振动还能确保能量的高利用率<sup>[36]</sup>。

贺地球等<sup>[37]</sup>在焊接3 mm厚的2219-T87铝合金板时,发现超声的引入使材料的上下流动性得以改善,增大了焊缝底部横截面尺寸,同时能有效抑制焊缝底部缺陷的形成。相比常规FSW,接头的平均抗拉强度提高了8.48%。

采用超声辅助,可以减小铝合金薄板焊接中不均匀的温度场和流变场所产生的残余应力。对1.8 mm厚的2024-T4铝合金进行焊接时,在转速1200 r/min、焊速160 mm/min的参数下引入超声,残余应力分布更加均匀,纵向残余应力比常规FSW平均降低了38 MPa (28.5%),提高了焊件的整体性能<sup>[35]</sup>。

轴向施加超声振动的方式可以使超声振动充分作用到焊缝底部,但焊接时作用于搅拌针的超声振动会与轴向压力发生一部分抵消。

### 3.2 超声能量施加于工件

为了解决上述两种工艺存在系统复杂、适应性不强等问题,武传松等<sup>[38]</sup>提出了将超声振动通过工具头直接施加在搅拌头前方的待焊工件上。Liu等<sup>[39-40]</sup>对3 mm厚的2024铝合金分别进行常规FSW和UAFSW的对比研究,发现UAFSW的主轴扭矩和焊机平均输出功率均较低,超声的作用效果在低热输入条件下更加显著。通过测试发现,超声还可以提高接头的拉伸性能,在高转速下尤为明显。

在焊接6 mm的AZ91-C镁合金时,超声振动极大提高了FSW接头的力学性能。较常规FSW,UAFSW使抗拉强度和硬度分别从195 MPa和79HV增加到225 MPa和87HV,平均粒径从4 μm细化至1.8 μm<sup>[41]</sup>。

对于异种材料,超声振动能够有效降低脆性金属间化合物层的生长速

率,提升界面各层的抗拉强度。吴程浩<sup>[42]</sup>在研究UAFSW时选用2024-T3铝合金和Q235碳素结构钢,发现较常规FSW,施加超声振动显著改善了焊缝表面成形质量;沿板厚方向,各层抗拉强度均得到提升,界面上层晶粒由2.7 μm细化至1.8 μm,中层脆性金属间化合物层厚度由1.71 μm减薄至0.90 μm,下层促进了钩状结构向焊缝底部的延伸,形成高强度的机械互锁;此外,超声振动还降低了峰值温度和轴向载荷,但接头底部仍存在部分未焊透缺陷。刘震磊<sup>[43]</sup>在研究航空Al/Mg材料FSW时,将超声装置置于待焊板材下方,增加了焊缝根部金属的材料流动行为,发现可减小甚至消除焊缝底部未焊接缺陷。

综上,超声施加于搅拌头上,可以有效减小轴向载荷和残余应力,在焊接载荷上的作用更大;超声施加于待焊工件上,超声的利用率更高,搅拌头的磨损更小,晶粒细化更加明显,拉伸性能更佳。

在UAFSW领域,诸多学者的研究都发现了超声的积极效果,包括有效降低焊接载荷;增强金属流动性,避免缺陷的产生;拓宽焊接工艺参数窗口以及提高接头性能。然而,声致效应机理虽然得到了一些探索,但目前仍然停留在理论阶段,目前尚无学者提出较为体系化的观点。因此,

UAFSW过程中超声对材料的作用机制有待进一步研究。

## 4 磁场辅助搅拌摩擦焊

磁场辅助搅拌摩擦焊(Magnetic assisted friction stir welding, MAFSW)主要基于电磁学理论,其核心原理在于利用电磁感应产生的电磁力和热效应,加强焊缝区域塑性金属的搅拌作用(图9<sup>[44]</sup>),进而细化焊核区的晶粒,并促进焊缝塑性金属的流动性。这有效改善了焊缝内部的成形情况,对接头焊接质量的提升起到了积极作用。与IHAFSW相比,此技术不需要在焊接区域通电,磁场指向作用区域更精准,同时提高了安全性。

MAFSW在改善焊接缺陷方面具有显著效果。在FSW过程中,造成接头内部缺陷的主要原因在于焊缝区域塑性金属流动不充分和热输入不足,使得塑性状态的金属体积减少。而磁场辅助能够保证热输入的同时,有效促进金属塑性流动,从而有效控制焊接内部缺陷。根据电磁感应原理,焊缝内部金属粒子受到明显的电磁力作用,有助于驱散金属杂质粒子,避免堆积现象,进一步改善焊接缺陷。张皓<sup>[45]</sup>设计的同轴旋转磁场辅助(HR-FSW)焊接装置在特定条件下焊接1 mm厚的6061-T6铝合金薄板时,发现磁场作用使得前

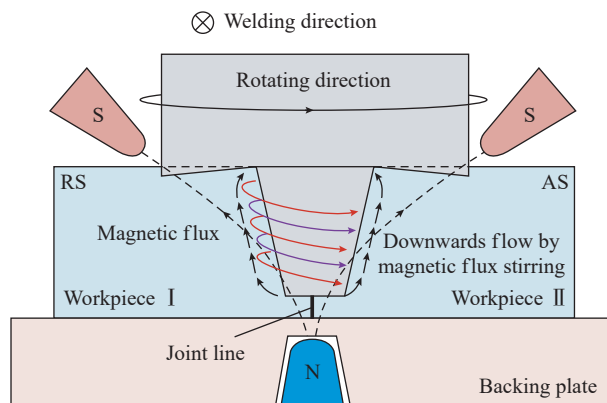


图9 磁场辅助超高速搅拌摩擦焊接原理图<sup>[44]</sup>

Fig.9 Schematic diagram of magnetic field-assisted ultra-fast friction stir welding<sup>[44]</sup>

进侧杂质金属堆积及“S”线等焊接缺陷得以消除。李志鹏<sup>[46]</sup>在研究永磁体涡流耦合接头成形时也发现,施加的汇聚电流和电磁搅拌力能有效增强不锈钢的塑化效果,形成微观结构中的钩状结构,从而提高316L不锈钢的延展性,抑制显微组织缺陷的形成。

MAFSW在促进晶粒细化方面也有显著效果。在搅拌和磁场的协同作用下,FSW焊接过程中金属的原子层会产生滑动,从而提高金属在搅拌摩擦焊缝内的迁移率。这增强了单位体积塑化金属之间的碰撞与摩擦,促使焊核区形成更为精细的等轴颗粒。Chen等<sup>[44]</sup>设计了跟随搅拌头旋转的磁场辅助装置,在特定条件下焊接1 mm厚的6061-T6铝合金时,发现焊缝晶粒明显细化,焊核区平均晶粒尺寸由6.54 μm减小到4.96 μm,并观察到精细的等轴晶体团簇的存在。李志鹏<sup>[46]</sup>在研究中也发现焊核区的晶粒得到了显著细化。

MAFSW能显著提高接头的力学性能。根据霍尔-佩奇原理,力学性能与材料晶粒尺寸密切相关。晶粒尺寸越细小,力学性能越高。施加磁场后,接头焊核区中的晶粒尺寸较常规FSW接头焊核区更为细小、组织更加均匀,磁场起到细晶强化的作用。张皓<sup>[45]</sup>发现在特定条件下常规FSW和HR-FSW下接头的轴肩作用区和搅拌区显微硬度曲线呈现出“W”型,且接头抗拉强度随焊速增加都呈现出“先升高后下降”的趋势;但两者对比,施加磁场后,接头各区域的硬度和抗拉强度明显更优。

总体而言,MAFSW在改善焊接缺陷、促进晶粒细化以提高接头性能方面展现出显著的优势。未来研究可以进一步深入探索磁场辅助在焊接过程中的作用机制,以期在更广泛的领域发挥其潜力。

## 5 展望

热量辅助搅拌摩擦焊在对能量的利用率以及双重热循环的控制方面,还需要深入的研究,这将使得对能场作用机制的理解更加深入。

超声辅助搅拌摩擦焊对于声致效应机理虽然进行了一些探索,但依然停留在理论阶段,超声振动如何控制脆性金属间化合物层的种类和厚度,目前尚无学者提出较为体系化的观点。因此,UAFSW过程中超声对材料的作用机制有待进一步研究。

磁场辅助作为一种全新的外部能场辅助方法,已被初步证明辅助焊接的可行性,对于该领域还需要有更深层次的理论与试验研究。这将有助于开发出更加高效可靠的焊接工艺,磁场辅助搅拌摩擦焊技术有望在更广泛领域得到应用。

## 6 结论

本文通过综述外加能量辅助搅拌摩擦焊的研究进展,得出以下结论。

(1)通过整理近年来在预热、冷却、超声、磁场的辅助作用下,对同种或异种材料FSW焊接工艺、材料流动、焊缝力学性能、表面形貌、微观结构影响的研究,证实了外部能场的加入对于FSW有积极的影响。

(2)通过控制焊接能量的输入,塑性变形阻力有所降低,接头强度及延展性有所改善,焊接效率得到提高。

(3)部分外加能场辅助FSW方式的弊端明显,复杂程度和接头力学性能的提升效果不成正比,如装置搭建方式复杂、能量难以控制及利用率低,因此相关技术实现工程化应用还需要进一步优化。

## 参考文献

[1] 毛育青,赵艺达,江周明,等.辅助加热温度对铝合金厚板FSW焊缝成形的影

响[J].航空学报,2018,39(12):421-428.

MAO Yuqing, ZHAO Yida, JIANG Zhouming, et al. Effect of assisted preheating temperature on weld formation of FSW of aluminum alloy thick plates[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(12): 421-428.

[2] 王玉晓. TC4钛合金背面加热辅助FSW的接头成形与性能研究[D].沈阳:沈阳航空航天大学,2017.

WANG Yuxiao. Study on forming and properties of TC4 titanium alloy joint assisted by back heating FSW[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2017.

[3] JI S D, LI Z W, WANG Y, et al. Joint formation and mechanical properties of back heating assisted friction stir welded Ti-6Al-4V alloy[J]. Materials & Design, 2017, 113: 37-46.

[4] 曾浩然. 搅拌针形貌及辅助加热对铝/镁FSW焊缝成形的影响[D].南昌:南昌航空大学,2019.

ZENG Haoran. Influence of stirring needle morphology and auxiliary heating on forming of Al/Mg FSW weld[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2019.

[5] 孙金睿,朱海,孙龙,等.外加能量辅助搅拌摩擦焊的最新研究进展[J].热加工工艺,2018,47(5):15-20.

SUN Jinrui, ZHU Hai, SUN Long, et al. Latest research progress of energy assisted friction stir welding[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(5): 15-20.

[6] LIU H J, GUO N, FENG J C. Friction stir welding assisted by microplasma arc[C]// Proceedings of 6th International Symposium on Friction Stir Welding. Montreal, 2006.

[7] 周春东. 钢的热源辅助搅拌摩擦焊装备与工艺研究[D].南京:南京理工大学,2017.

ZHOU Chundong. Study on equipment and technology of heat source-assisted friction stir welding of steel[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017.

[8] 许惠斌,罗磊,张硕等.焊接电流对电弧辅助下铝钢搅拌摩擦焊接头界面微观结构的影响[C]//第二十次全国焊接学术会议论文集.兰州,2015.

XU Huibin, LUO Lei, ZHANG Shuo, et al. The influence of welding current on the microstructure of aluminum-steel mixing friction welding head interface by arc assistance[C]// Proceedings of the 20th National Welding Conference. Lanzhou, 2015.

[9] BANG H, BANG H, JEON G, et al.

Gas tungsten arc welding assisted hybrid friction stir welding of dissimilar materials Al6061-T6 aluminum alloy and STS304 stainless steel[J]. *Materials & Design*, 2012, 37: 48–55.

[10] 宋新华, 修腾飞, 金湘中, 等. 激光辅助加热搅拌摩擦焊 3 维流场数值模拟[J]. *激光技术*, 2016, 40(3): 353–357.

SONG Xinhua, XIU Tengfei, JIN Xiangzhong, et al. Numerical simulation of 3-D flow field on laser-assisted heating friction stir welding of steel[J]. *Laser Technology*, 2016, 40(3): 353–357.

[11] CAMPANELLI S L, CASALINO G, CASAVOLA C, et al. Analysis and comparison of friction stir welding and laser assisted friction stir welding of aluminum alloy[J]. *Materials*, 2013, 6(12): 5923–5941.

[12] WADA T, MORISADA Y, SUN Y F, et al. Friction stir welding of medium carbon steel with laser-preheating[J]. *ISI International*, 2020, 60(1): 153–159.

[13] FEI X J, YE Y, JIN L L, et al. Special welding parameters study on Cu/Al joint in laser-heated friction stir welding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 256: 160–171.

[14] 许辉, 封小松, 尹玉环, 等. 激光同轴辅助搅拌摩擦焊的激光加热特性研究[J]. *焊接技术*, 2017, 46(5): 73–77.

XU Hui, FENG Xiaosong, YIN Yuhuan, et al. Study on laser heating characteristics of laser coaxial assisted friction stir welding[J]. *Welding Technology*, 2017, 46(5): 73–77.

[15] LIU X, LAN S H, NI J. Electrically assisted friction stir welding for joining Al 6061 to TRIP 780 steel[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 219: 112–123.

[16] CHOWDHURY I, SENGUPTA K, SINGH D K, et al. Study of mechanical properties of mild steel joint made by electrically assisted friction stir welding using DC and AC[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 44: 3959–3966.

[17] SHAFFER D, GRIMM T J, RAGAI I, et al. Utilization of XSYTIN-1 tool in electrically-assisted friction stir welding of dissimilar metals—Al 6061–T651 to mild steel[J]. *Advanced Materials Research*, 2019, 1152: 31–41.

[18] CHEN S J, ZHANG H W, JIANG X Q, et al. Mechanical properties of electric assisted friction stir welded 2219 aluminum alloy[J]. *Journal of Manufacturing Processes*,

2019, 44: 197–206.

[19] SENGUPTA K, MONDAL A K, BOSE D, et al. Characterization of electrical assisted friction stir welded for joining similar and dissimilar material plates of mild steel and stainless steel[C]//*Proceedings of 2020 IEEE 1st International Conference for Convergence in Engineering (ICCE)*. Piscataway: IEEE, 2020: 26–31.

[20] MOHAN D G, TOMKÓW J, GOPI S. Induction assisted hybrid friction stir welding of dissimilar materials AA5052 aluminium alloy and X12Cr13 stainless steel[J]. *Advances in Materials Science*, 2021, 21(3): 17–30.

[21] 姜红扬. 局部感应加热对 2219 铝合金焊缝组织和性能的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.

JIANG Hongyang. Influence of local induction heating process on 2219 aluminum alloy texture and property[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.

[22] RAJ S, BISWAS P. High-frequency induction-assisted hybrid friction stir welding of inconel 718 plates[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2022, 144(4): 041014.

[23] 王斌, 刘含伟, 李庆庆, 等. 高频感应加热处理对 2219 铝合金 FSW 焊接接头残余应力的影响[J]. *电焊机*, 2019, 49(5): 59–63.

WANG Bin, LIU Hanwei, LI Qingqing, et al. Effect of high frequency induction heating on residual stress of 2219 alloy FSW welded joints[J]. *Electric Welding Machine*, 2019, 49(5): 59–63.

[24] KAUSHIK P, KUMAR DWIVEDI D. Induction preheating in FSW of Al-Steel combination[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 46: 1091–1095.

[25] JIANG Y M, ZHAO Y, ZHAO Z X, et al. The strengthening mechanism of FSWed spray formed 7055 aluminum alloy under water mist cooling condition[J]. *Materials Characterization*, 2020, 162: 110185.

[26] 汪虎, 韦叶, 王巍, 等. 7075 铝合金不同冷却介质条件下搅拌摩擦焊接头的组织与性能[J]. *电焊机*, 2020, 50(3): 70–74.

WANG Hu, WEI Ye, WANG Wei, et al. Microstructure and property of 7075 aluminium alloy weld joint by FSW[J]. *Electric Welding Machine*, 2020, 50(3): 70–74.

[27] LUO L, YANG B H, YANG X R, et al. Effects of different cooling conditions on microstructure and precipitation behavior of

fine-grained Al–Zn–Mg–Cu alloy friction stir welding joint[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 24: 4534–4550.

[28] 许楠, 包晔峰, 宋元宁. H70 黄铜冷源辅助搅拌摩擦焊接头微观组织和力学性能分析[J]. *焊接学报*, 2018, 39(7): 93–96.

XU Nan, BAO Yefeng, SONG Qining. Research on microstructure and mechanical properties of cold source assisted friction stir welded H70 brass joint[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2018, 39(7): 93–96.

[29] MEHTA K P, CARLONE P, ASTARITA A, et al. Conventional and cooling assisted friction stir welding of AA6061 and AZ31B alloys[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, 759: 252–261.

[30] DERAZKOLA H A, ELYASI M. Cooling-assist friction stir welding: A case study on AA6068 aluminum alloy and copper joint[J/OL]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, [2023–11–03]. <https://doi.org/10.1177/09544054231209779>.

[31] AGHAJANI DERAZKOLA H, GARCÍA E, EYVAZIAN A, et al. Effects of rapid cooling on properties of aluminum-steel friction stir welded joint[J]. *Materials*, 2021, 14(4): 908.

[32] 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心区晶粒组织[J]. *材料工程*, 2023, 51(12): 75–83.

JING Rui, TAN Maoju, WU Chuansong, 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.

[33] PARK K. Development and analysis of ultrasonic assisted friction stir welding process[D]. Fort Anna: University of Michigan, 2009.

[34] 钟益斌. 超声辅助 FSW 的振动施加方式与工艺实验研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.

ZHONG Yibin. Experimental study on vibration application mode and technology of ultrasonic-assisted FSW[D]. Jinan: Shandong University, 2016.

[35] 叶绍勇, 贺地求, 杨坤玉, 等. 超声辅助搅拌摩擦焊对焊缝残余应力的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2013, 23(7): 1843–1847.

YE Shaoyong, HE Diqiu, YANG Kunyu, et al. Effect of ultrasonic assisted friction stir

welding on residual stress of welded joint[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2013, 23(7): 1843–1847.

[36] 何长树, 鄢默繁, 张志强, 等. 轴向超声振动对搅拌摩擦焊过程中金属流动行为的影响[J]. *金属学报*, 2021, 57(12): 1614–1626.

HE Changshu, QIE Mofan, ZHANG Zhiqiang, et al. Effect of axial ultrasonic vibration on metal flow behavior during friction stir welding[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2021, 57(12): 1614–1626.

[37] 贺地求, 赵志峰, 赖瑞林, 等. 2219-T87 超声辅助搅拌摩擦焊接头组织与性能[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2018, 45(4): 41–47.

HE Diqu, ZHAO Zhifeng, LAI Ruilin, et al. Research on the microstructure and mechanical properties of ultrasonic assisted friction stir welding joints of 2219-T87 aluminum alloy[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2018, 45(4): 41–47.

[38] 武传松, 刘小超. 超声振动辅助搅拌摩擦焊的研究进展[J]. *焊接*, 2013(4): 3–8, 69.

WU Chuansong, LIU Xiaochao. Research

progress and trends in ultrasound vibration assisted friction stir welding[J]. *Welding & Joining*, 2013(4): 3–8, 69.

[39] LIU X C, WU C S. Material flow in ultrasonic vibration enhanced friction stir welding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 225: 32–44.

[40] LIU X C, WU C S, PADHY G K. Characterization of plastic deformation and material flow in ultrasonic vibration enhanced friction stir welding[J]. *Scripta Materialia*, 2015, 102: 95–98.

[41] BARADARANI F, MOSTAFAPOUR A, SHALVANDI M. Effect of ultrasonic assisted friction stir welding on microstructure and mechanical properties of AZ91-C magnesium alloy[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2019, 29: 2514–2522.

[42] 吴程浩. 附加超声对铝/钢 FSW 接头界面行为及力学性能的影响[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2023.

WU Chenghao. Effect of additional ultrasound on interface behavior and mechanical properties of aluminum/steel FSW joints[D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2023.

[43] 刘震磊. 超声辅助航空 Al/Mg 材

料搅拌摩擦焊机理及工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.

LIU Zhenlei. Study on mechanism and technology of ultrasonic-assisted friction stir welding of aviation Al/Mg materials[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.

[44] CHEN X Y, CHEN S J, LIU Z H, et al. Magnetic field-assisted ultra-high-speed friction stir welding[J]. *Materials Letters*, 2023, 331: 133447.

[45] 张皓. 6061-T6 铝合金薄板磁场辅助高转速搅拌摩擦焊工艺研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2022.

ZHANG Hao. Study on high-speed friction stir welding technology of 6061-T6 aluminum alloy sheet assisted by magnetic field[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2022.

[46] 李志鹏. 铝/钢异种金属永磁体涡流耦合高转速搅拌摩擦焊接技术[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2020.

LI Zhipeng. Eddy current coupling high-speed friction stir welding technology for aluminum/steel dissimilar metal permanent magnets[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2020.

## Review of External Energy Field Assisted Friction Stir Welding

CHEN Shujin, ZHANG Shuai, ZHANG Rongzhou, LI Zhihao, LI Moqi, LIU Jianhua

(School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China)

**[ABSTRACT]** External energy field assisted friction stir welding (FSW) is an improved solid-phase welding method that is widely used in aerospace, automotive manufacturing, and energy industries. By introducing external energy, the microstructure and properties of the joint can be improved, thereby enhancing the welding quality and efficiency. This article classifies external energy field-assisted FSW techniques, summarizes the selection and control of energy fields, optimization of process parameters, and summarizes the effects of external energy fields on welding temperature, axial load, and joint microstructure and properties. Finally, this article summarizes the future development trends of external energy field-assisted FSW technology.

**Keywords:** Friction stir welding (FSW); External energy field methods; Joint performance; Grain refinement; Axial loading; Temperature gradient

(责编 逸飞)