

引文格式: 李文亚, 唐益爽, 邹阳帆, 等. 协同双面搅拌摩擦焊接技术[J]. 航空制造技术, 2024, 67(13): 14-19.

LI Wenya, TANG Yishuang, ZOU Yangfan, et al. Synergistically double-sided friction stir welding[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(13): 14-19.

## 协同双面搅拌摩擦焊接技术\*

李文亚<sup>1</sup>, 唐益爽<sup>1</sup>, 邹阳帆<sup>1</sup>, 王卫兵<sup>2</sup>

(1. 西北工业大学, 西安 710072;

2. 北京索德瀚智能科技有限公司, 北京 100089)

[摘要] 协同双面搅拌摩擦焊接(SDS-FSW)作为搅拌摩擦焊接技术的一种新的改进形式,显著改善了传统搅拌摩擦焊接变形大、焊接效率低等问题,对焊接质量也有提升作用,适用于大尺寸、大厚度的板材或型材的焊接。但目前 SDS-FSW 仍处于初始研发阶段,相关的理论及应用研究较少,研究成果主要集中在 6061 铝合金上。本文主要介绍 SDS-FSW 技术的发展历程、技术特点与典型研究结果及应用前景,以期对 SDS-FSW 技术的发展及实际工程推广提供参考。

关键词: 搅拌摩擦焊接(FSW); 协同双面搅拌摩擦焊接(SDS-FSW); 铝合金; 显微组织; 力学性能

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2024.13.014



李文亚

教授, 博士生导师, 主要从事先进固相焊接技术研究。

搅拌摩擦焊接(Friction stir welding, FSW)是英国焊接研究所(TWI)于1991年发明的一种固相连接技术<sup>[1-3]</sup>。在FSW过程中,旋转的搅拌头与焊件摩擦生热,将材料加热到塑性状态。同时,塑性材料在搅拌头旋转作用下发生迁移且受到轴肩的顶锻作用,最终形成致密焊缝<sup>[4]</sup>。使用FSW焊接铝合金、镁合金等可以解决传统熔化焊接时出现的热裂纹、气孔、元素偏析等缺陷,现已被广泛应用于多个行业中<sup>[5-6]</sup>。在航空航天领域,美国的波音公司首先将FSW应用在了Delta系列运载火箭铝合金贮箱中间舱段的连接制造中,该火箭于1999年成功发射升空;2002年中国航空制造技术研究院与英国焊接研究所合作成立了中国搅拌摩擦焊中心,从而使FSW技术正式引入中国。目前,FSW技术已经在国内航空航天、轨道交通、新能源汽车等领域获得广泛应用。

随着制造业的快速发展,对大尺寸、大厚度、高质量、高效率的FSW焊接需求越来越高。研究表明,在生产中采用FSW对铝合金挤压型材进行焊接,能够有效提高焊接质量与制造效率<sup>[7]</sup>。但传统的单面FSW(Single-sided FSW, SS-FSW)沿厚度方向产生了不均匀的热-力耦合作用,因而焊后冷却阶段易产生较大的变形与残余应力,不仅增加了焊后矫形工序,提高生产成本,严重时甚至导致产品不合格,因此亟需研发更灵活、更先进的FSW工艺<sup>[8]</sup>。协同双面搅拌摩擦焊接(Synergistically double-sided FSW, SDS-FSW)是FSW的一种新的改进形式,在焊接过程中通过两面双搅拌头的同时使用,可以实现焊件上下表面的同步焊接成形,显著减小焊后变形,提高焊接效率,在大型/特殊铝合金、镁合金部件的焊接过程中有着广泛的应用前景。

\* 基金项目: 陕西省重点科技创新团队项目(2024RS-CXTD-20)。

# 1 协同双面搅拌摩擦焊接原理与发展历程回顾

经过 30 多年的发展, FSW 已广泛应用于铝合金、镁合金等轻质材料的连接。但正如前文所述, SS-FSW 在焊接过程中搅拌头轴肩只作用于工件单一表面, 沿厚度方向不均匀的热-力耦合作用不仅容易产生较大的变形与残余应力, 而且在焊接厚板和中厚板时, 还容易产生不均匀的微观组织和根部缺陷, 影响接头力学性能<sup>[9]</sup>。此外, SS-FSW 需要额外添加背部刚性支撑, 不仅提高了对工装和设备刚度的要求, 还使得 SS-FSW 难以实现中空型材等特殊结构的焊接。因此, 有学者开始了双面搅拌摩擦焊接( Double-sided FSW, DS-

FSW) 技术的研究, 除本文所介绍的 SDS-FSW 外, 双轴肩搅拌摩擦焊接( Bobbin tool FSW, BT-FSW) 和顺序双面搅拌摩擦焊接( Conventional sequentially double-sided FSW, CDS-FSW) 是目前研究较为广泛的两种 DS-FSW 技术<sup>[10]</sup>。

DS-FSW 技术原理如图 1 所示<sup>[11-13]</sup>, 其中, 图 1 (a) 和(b)为 BT-FSW 焊接原理和搅拌头形貌<sup>[11-12]</sup>。与 SS-FSW 相比, BT-FSW 通过增加下轴肩实现自支撑, 同时降低了接头沿厚度方向的温度梯度, 减小了接头组织的不均匀性, 避免了根部缺陷的产生<sup>[4, 14]</sup>。但在 BT-FSW 过程中, 上、下轴肩沿相同方向以相同转速旋转, 搅拌针承受较大的拉应力、扭矩及弯矩, 极易断裂且容易磨损, 大大

限制了其焊接速度及应用范围<sup>[14]</sup>。虽然目前根据 BT-FSW 进一步研发出了可调间隙式、逆向旋转式及轴肩静止式 BT-FSW 等特种双轴肩搅拌摩擦焊技术, 但都只能在一定程度上优化 BT-FSW 焊接工艺<sup>[4]</sup>。

其实, 早在 1991 年英国 TWI 就提出了双面搅拌摩擦焊接的概念, 指出可以同时使用两个或两个以上的搅拌摩擦焊接工具对同一个工件进行焊接, 也提到了可以在工件的上表面和下表面同时使用两个工具进行焊接<sup>[15]</sup>。在 2009 年, 日本三菱日立制铁机械株式会社申请了一项双面搅拌摩擦焊接工艺专利<sup>[16]</sup>。该专利采用分离式的双搅拌头在工件两面同时焊接, 其中一个搅拌头前端部分存在突起部, 而另一个搅拌头前端具有收纳该突起部的凹部, 通过这两个搅拌头的相对配置实现工件上、下表面的同步搅拌。2012 年, 国内哈尔滨工业大学刘会杰教授团队<sup>[17]</sup>也提出了一种双面对称搅拌摩擦焊接工艺, 该工艺所使用的上下搅拌头几何尺寸相同, 在焊接过程中, 上下搅拌头相对于被焊工件始终处于对称位置。

此后, 日本大阪大学 Fujii 教授团队<sup>[18-19]</sup>利用双面搅拌摩擦焊接的原理成功实现了镁合金的焊接, 焊接所使用的下搅拌头有平面( Flat-DFSW) 和凹形( Concave-DFSW) 两种, 图 2 为 Concave-DFSW 搅拌头形貌。研究表明, 使用双面搅拌摩擦焊接能够获得更加复杂和充分的材料流动, 在镁合金接头的搅拌区获得随机组织, 从而提高了接头的力学性能。

随着对铝合金焊接质量和生产效

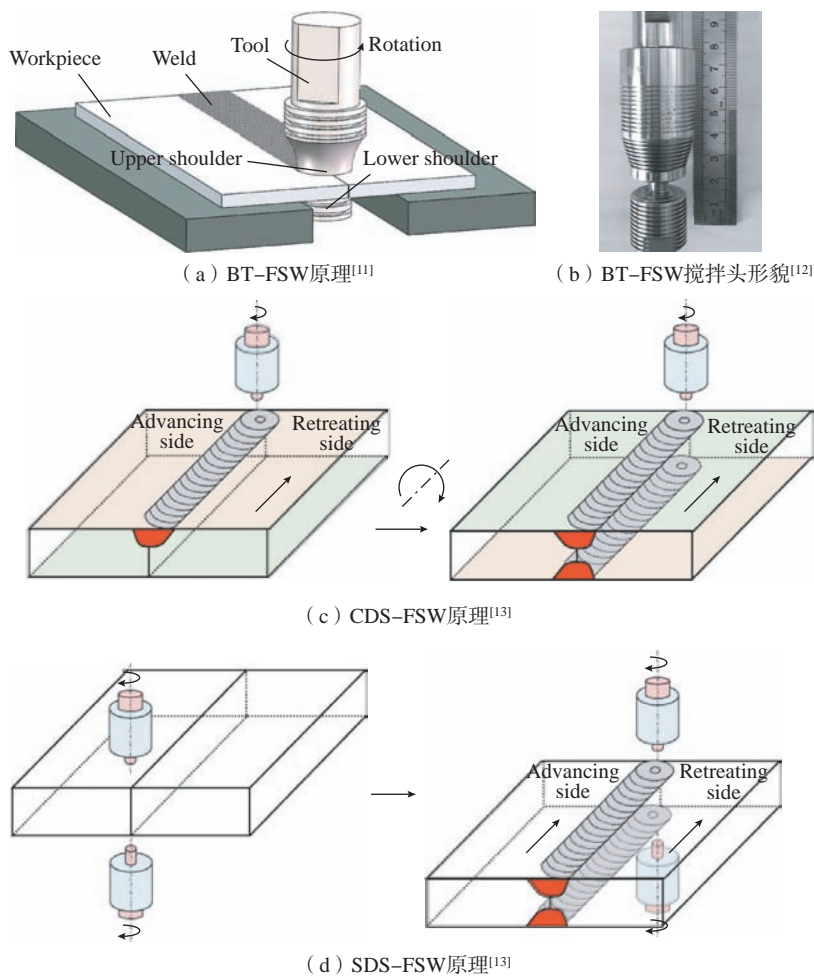


图 1 DS-FSW 示意图  
Fig.1 Schematic view of DS-FSW



上搅拌头形貌 下搅拌头形貌  
图 2 Concave-DFSW 搅拌头形貌<sup>[19]</sup>  
Fig.2 Morphology of Concave-DFSW welding tools<sup>[19]</sup>

率要求的不断提高,西北工业大学李文亚教授团队<sup>[13]</sup>率先开始了 SDS-FSW 技术在铝合金应用上的研究,并与北京索德瀚智能科技有限公司合作开发了一种新型的 SDS-FSW 设备。图 3 为焊接设备和焊接过程中的装夹示意图,该设备具有上下两个机头,并分别由两个主轴控制,通过程序调控可实现精确控制与智能化对中。因此 SDS-FSW 技术在焊接过程中可根据实际需要改变上下搅拌头的尺寸形貌、旋转速度、旋转方向、焊接倾角及相对位置,达成灵活焊接与协同控制,从而实现大型/特殊铝合金部件的高质量焊接。与目前国内外研究较多的 CDS-FSW 技术相比, SDS-FSW 只需进行一次焊接,而 CDS-FSW 是先完成一面的焊接,然后翻转工件焊接另一面,因此 SDS-FSW 可以显著提高焊接效率,减小焊后变形<sup>[20-25]</sup>。

## 2 协同双面搅拌摩擦焊接技术特点

### 2.1 协同双面搅拌摩擦焊接铝合金接头显微组织及力学性能

SDS-FSW 的整体焊缝轮廓呈现

“沙漏型”,表现为两个 SS-FSW 焊缝的叠加,图 4 所示为 SS-FSW、CDS-FSW 及 SDS-FSW 接头焊缝横截面在光镜下的显微形貌。根据不同的热力学过程, SDS-FSW 接头的显微组织与 SS-FSW 接头相同,可划分为焊核区(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(Base material, BM)4 个区域。此外,由图 4 可知,在相同的焊接速度和搅拌头转速下,采用 SDS-FSW 与 SS-FSW 相比可以减少接头缺陷,与 CDS-FSW 相比,材料流动更加充分,显微组织沿厚度方向的均匀性提高。

图 5 为相同焊接参数下 SS-FSW、CDS-FSW 和 SDS-FSW 接头典型拉伸试样的应力-应变曲线,可知 SDS-FSW 在提高焊接效率的同时,拉伸性能可以达到与 CDS-FSW 相当的水平,强度和延伸率与 SS-FSW 相比分别提升了约 30% 和 250%。此外, Zou 等<sup>[13]</sup>根据实际需要,对 8 mm 厚的 6061-T6 铝合金进行了 SDS-FSW 和 CDS-FSW 焊接试验,选择搅拌针长度为 3 mm 的搅拌头;虽然两种

焊接方式都没有焊透(产品需要),但结果表明与 CDS-FSW 相比, SDS-FSW 焊后变形量明显减小,接头横截面上的显微硬度分布更加均匀(图 6),拉伸性能在不同焊接参数下始终优于 CDS-FSW 接头。

### 2.2 协同双面搅拌摩擦焊接铝合金接头温度场

焊接过程中温度场的分布对 FSW 接头的微观组织演变和焊接质量起着重要作用,随着有限元方法和计算机技术的发展,数值模拟已成为

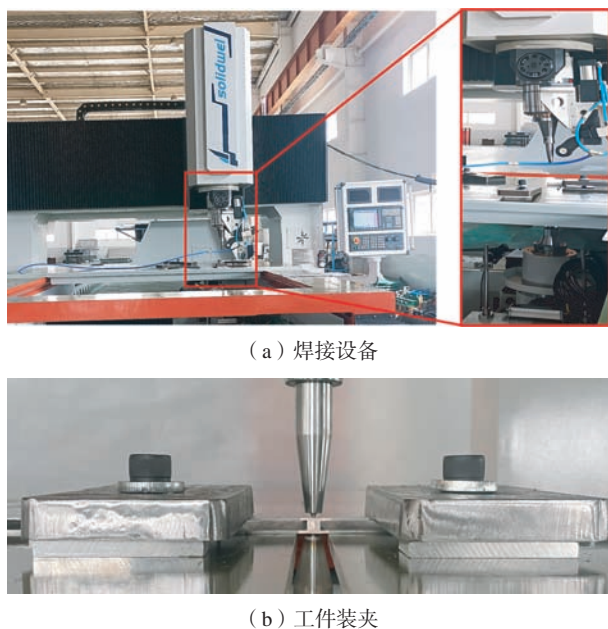


图 3 SDS-FSW 焊接设备和工件装夹  
Fig.3 Welding equipment of SDS-FSW and workpiece clamping

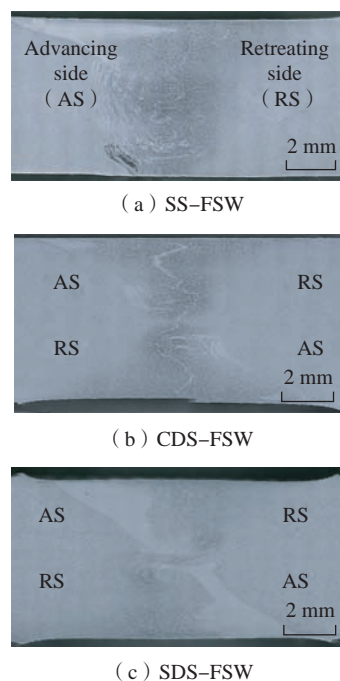


图 4 SS-FSW、CDS-FSW 和 SDS-FSW 接头横截面宏观形貌

Fig.4 Cross-section morphology of SS-FSW, CDS-FSW and SDS-FSW joints

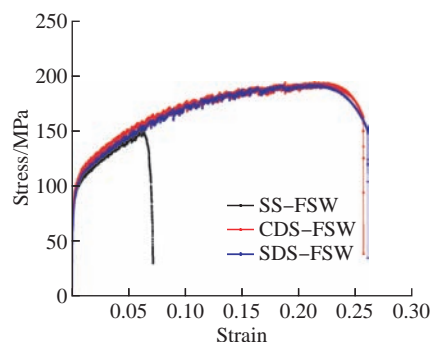


图 5 SS-FSW、CDS-FSW 和 SDS-FSW 接头应力-应变曲线

Fig.5 Stress-strain curves for SS-FSW, CDS-FSW and SDS-FSW joints

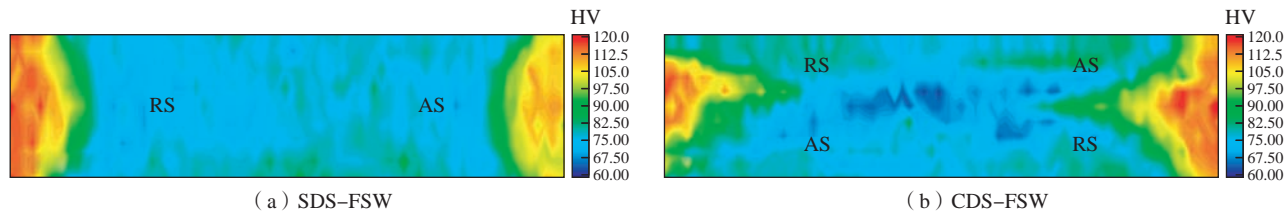


图6 SDS-FSW和CDS-FSW接头显微硬度云图<sup>[13]</sup>  
Fig.6 Hardness maps of SDS-FSW and CDS-FSW joints<sup>[13]</sup>

研究FSW焊接过程的重要辅助方法,主要分为在焊件上施加焊接热源模型的方法<sup>[26]</sup>、基于计算固体力学(Computational solid mechanics, CSM)的方法<sup>[27-28]</sup>与基于计算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)的方法<sup>[29-31]</sup>。基于CSM的方法又分为任意拉格朗日-欧拉方法(Arbitrary Lagrange-Euler, ALE)与耦合欧拉-拉格朗日方法(Coupled Eulerian-Lagrangian, CEL)等,其中CEL适用于处理大变形问题,可以模拟FSW的全过程,且随着计算机技术的快速发展,目前该方法的仿真耗时已处于可接受的范围内。

图7为采用欧拉-拉格朗日热力耦合模型获得的SDS-FSW和CDS-FSW接头横截面及其中心线上的温度分布规律。可知,在相同的焊接参数下,SDS-FSW与CDS-FSW接头温度分布的相同点:(1)高温区位于搅拌头直接接触区域,随着到搅拌头中心距离的增加,高温区向周围扩散形成明显的温度梯度;(2)前进侧(AS)和后退侧(RS)的温度以非对称的方式分布,RS的温度高于AS。两者的不同点:(1)在SDS-FSW焊接过程中,由于焊件同时受到了上下对称的两个搅拌头的影响,接头沿厚度方向的温度梯度减小,焊缝横截面的温度分布沿水平方向基本对称,同时峰值温度升高;(2)对于SDS-FSW,当上下搅拌头转动方向相同时(图7),上下焊缝中温度较高的RS位于同一侧,因此温度场不对称性较为明显,但当上下搅拌头转动方向相反时,该现象会被改

善;(3)在CDS-FSW焊接过程中有“瞬时孔洞”形成,而SDS-FSW焊接过程中双搅拌头的使用可以促进材料的充分流动与混合。

### 3 协同双面搅拌摩擦焊接技术应用展望

通过对铝合金SDS-FSW的试验研究,可以看到SDS-FSW作为FSW的一种新的改进形式,与SS-FSW、BT-FSW和CDS-FSW等搅拌摩擦焊接技术相比具有以下优点。(1)提高焊接效率:SDS-FSW具有两个搅拌头同时产热,且只需进行一次装夹,工序简单;(2)减小变形:SDS-FSW从焊件两侧平衡地施加热量和压力,可以减小焊接件的变形和残余应力,有助于保持焊接件的尺寸稳定性和几何形状;(3)改善焊缝质量:SDS-FSW采用两个搅拌头分别作用于被焊工件上下表面,避免了根部缺陷的产生,提高了接头沿厚度方向受到热-力耦合作用的均匀性,从而提高接头微观组织均匀性和力学性能;(4)适用性广泛:SDS-FSW焊接过程中可以灵活地调整两个搅拌头的相对位置、旋转方向和尺寸形貌,从而可以实现大型复杂部件的焊接;(5)提高经济效益:SDS-FSW改善了设备和搅拌头的受力情况,延长了设备和搅拌头的使用寿命。因此,SDS-FSW适用于大尺寸、大厚度的铝合金、镁合金等板材或型材的焊接。但目前SDS-FSW还处于基础研发阶段,对于焊接性较好的6061铝合金实现了良好焊接,但对于2024及7075等高强铝合金缺乏

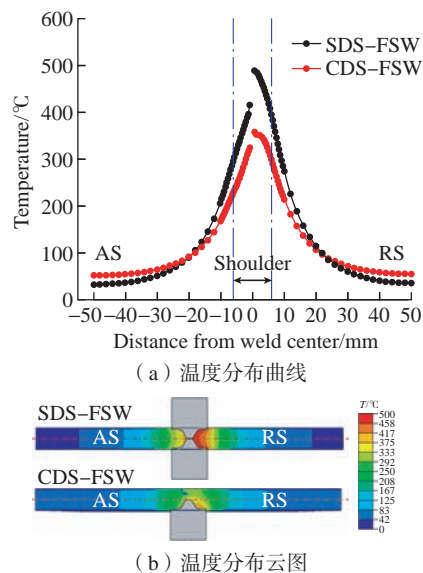
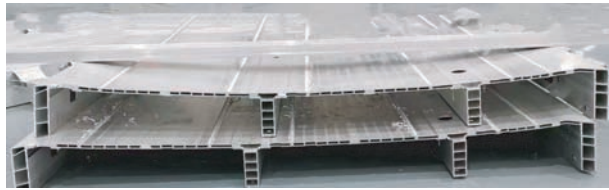


图7 SDS-FSW和CDS-FSW接头焊缝横截面及其中心线温度分布

Fig.7 Temperature distribution on the cross section and its center line of SDS-FSW and CDS-FSW joints

可行性试验验证,其技术成熟度也远不如SS-FSW。

在航空、航天及汽车制造等领域中,轻量化已成为目前的主要发展趋势,其中铝合金被视为是实现轻量化的首选材料之一。SDS-FSW可以很好地解决大型/特殊铝合金部件焊接变形大、焊接效率低的问题,提高了FSW对结构的适应性,同时降低了制造成本,因而引起了广泛关注。目前,国内北京索德瀚智能科技有限公司已研制出可直接与机器人衔接的SDS-FSW设备,截至2022年,该设备已进驻多家企业,投入量产<sup>[32]</sup>。图8所示为北京索德瀚智能科技有限公司分别采用CDS-FSW和SDS-FSW焊接工艺生产的新能源汽车电池托盘及生产流程。可知,当采用



(a) 采用CDS-FSW焊接 (正面FSW→打磨飞边→压力机矫形→反面FSW→打磨飞边→最后整形)



(b) 采用SDS-FSW焊接 (正反面同时FSW→打磨飞边)

图8 采用两种焊接方式的新能源汽车电池托盘

Fig.8 New energy vehicle battery trays by two welding methods

CDS-FSW 焊接时,焊后平面度变形为几厘米,需要进行两次矫形工艺,不仅工序繁琐、效率低、成本高,而且影响了产品质量;而当采用 SDS-FSW 焊接时,焊后平面度 $\leq 1.5$  mm,工序简化、效率提高,且产品质量有所提升。此外,英国焊接研究所在 2023 年 5 月展示了 SDS-FSW 技术在钢材制造中的应用<sup>[33]</sup>。Matsushita 等<sup>[34]</sup>通过研究也证实了可采用 SDS-FSW 焊接先进高强度钢用于生产汽车零件。随着对铝合金焊接质量、效率和多功能性要求的不断提高,SDS-FSW 技术在铝合金上的应用将逐步拓展,从而为航空航天铝合金材料的焊接提供更高效、更可靠的解决方案。

#### 4 结论

本文从协同双面搅拌摩擦焊接原理、发展历程、技术特点以及发展前景 4 个方面介绍了这项新技术。(1) SDS-FSW 与传统 FSW 具有相同的工作原理,但采用双搅拌头使其展现出了显著的优越性与灵活性,适用于大尺寸、大厚度的板材或型材的焊接,能够显著减小焊后变形并提高焊接效率。(2) 目前对 SDS-FSW 技术的研究仍处于起步阶段,虽然在 6061 铝合金上取得了很好的试验验证,但其实际应用还相对有限。(3) 为了进一步优化焊接工艺以提升不同系列合金 SDS-FSW 的接头性能,需要深入挖掘焊接工艺参数、组织演变、接头性能之间的相互关系,了解焊接过程中温度场演变及材料流动规律,从而促进 SDS-FSW 在航空航

天等工程中的实际应用。

#### 参考文献

- [1] VICTOR CHRISTY J, ISMAIL MOURAD A H, SHERIF M M, et al. Review of recent trends in friction stir welding process of aluminum alloys and aluminum metal matrix composites[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(11): 3281-3309.
- [2] MA Z Y, FENG A H, CHEN D L, et al. Recent advances in friction stir welding/processing of aluminum alloys: Microstructural evolution and mechanical properties[J]. Critical Reviews in Solid State & Material Sciences, 2018, 43(4): 269-333.
- [3] LIU H H, MORISADA Y, FUJII H. Friction stir welding: Process, temperature, microstructure and properties[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2023, 28(8): 619-632.
- [4] 温泉,李文亚,王非凡,等. 双轴肩搅拌摩擦焊接方法研究进展[J]. 航空制造技术, 2017, 60(12): 16-23.
- [5] WEN Quan, LI Wenya, WANG Feifan, et al. Research progress on bobbin tool friction stir welding[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(12): 16-23.
- [6] LIU X C, WANG Q, PEI X J, et al. Microstructural evolution of 6061-T6 aluminum alloy in vortex-friction stir welding[J]. Materials Characterization, 2023, 195: 112544.
- [7] 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.
- [8] LU X, ZHANG C S, ZHAO G Q, et al. State-of-the-art of extrusion welding and proposal of a method to evaluate quantitatively welding quality during three-dimensional extrusion process[J]. Materials & Design, 2016, 89: 737-748.
- [9] XU W F, ZHANG W, WU X L.

Corrosion behavior of top and bottom surfaces for single-side and double-side friction stir welded 7085-T7651 aluminum alloy thick plate joints[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2017, 48(3): 1078-1091.

[9] LU X H, LUAN Y H, QIAO J H, et al. Optimization of process parameters in friction stir welding of 2219 aluminum alloy thick plate[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 129(9): 4201-4215.

[10] 杨夏炜, 孟廷曦, 褚强, 等. 铝合金双面搅拌摩擦焊接的研究进展[J/OL]. 机械工程学报, 2024 (2024-03-11). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20240310.1726.004.html>.

YANG Xiawei, MENG Tingxi, CHU Qiang, et al. Research progress in double-sided friction stir welding of aluminum alloy[J/OL]. Journal of Mechanical Engineering, 2024 [2024-03-11]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20240310.1726.004.html>.

[11] WEN Q, LI W Y, PATEL V, et al. Investigation on the effects of welding speed on bobbin tool friction stir welding of 2219 aluminum alloy[J]. Metals and Materials International, 2020, 26(12): 1830-1840.

[12] YANG C, NI D R, XUE P, et al. A comparative research on bobbin tool and conventional friction stir welding of Al-Mg-Si alloy plates[J]. Materials Characterization, 2018, 145: 20-28.

[13] ZOU Y F, LI W Y, TANG Y S, et al. A comparative study of microstructure and mechanical properties of conventional and synergistic double-sided FSW joints of 6061 z-aluminum alloy[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2023, 28(8): 784-791.

[14] WANG G Q, ZHAO Y H, TANG Y Y. Research progress of bobbin tool friction stir welding of aluminum alloys: A review[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2020, 33(1): 13-29.

[15] STAINES D J, WATTS E R, NORRIS I M. The simultaneous use of two or more

- friction stir welding tools[EB/OL]. (2005–01–13)[2024–03–05]. <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/the-simultaneous-use-of-two-or-more-friction-stir-welding-tools-january-2005>.
- [16] KAGA S, ONOSE M, TOMINAGA N, et al. Two-surface friction stir welding method and device, tool set for two-surface friction stir: JPWO 2011061826A1[P]. 2013–04–04.
- [17] 赵运强, 刘会杰, 李金全, 等. 双面 对称搅拌摩擦焊接方法: CN102601516A[P]. 2012–07–25.
- ZHAO Yunqiang, LIU Huijie, LI Jinquan, et al. Method of double-sided symmetric friction stir welding: CN102601516A[P]. 2012–07–25.
- [18] CHEN J, FUJII H, SUN Y F, et al. Fine grained Mg–3Al–1Zn alloy with randomized texture in the double-sided friction stir welded joints[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2013, 580: 83–91.
- [19] CHEN J, UEJI R, FUJII H. Double-sided friction-stir welding of magnesium alloy with concave–convex tools for texture control[J]. *Materials & Design*, 2015, 76: 181–189.
- [20] XU W F, LU H J, LI X H, et al. Microstructure evolution and stress corrosion cracking sensitivity of friction stir welded high strength AA7085 joint[J]. *Materials & Design*, 2021, 212: 110297.
- [21] 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.
- [22] YANG C, ZHANG J F, MA G N, et al. Microstructure and mechanical properties of double-side friction stir welded 6082Al ultra-thick plates[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2020, 41: 105–116.
- [23] RATURI M, BHATTACHARYA A. Electrochemical corrosion of AA6061–AA7075 double sided FSW joints prepared with and without secondary heating[J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2022, 38: 590–612.
- [24] DU C C, PAN Q H, CHEN S J, et al. Effect of rolling on the microstructure and mechanical properties of 6061–T6 DS–FSW plate[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 772: 138692.
- [25] 陈玉华, 钟宇, 谢吉林, 等. AZ31 厚板镁合金双面搅拌摩擦焊接头组织及性能研究[J]. *航空制造技术*, 2022, 65(21): 38–44, 53.
- CHEN Yuhua, ZHONG Yu, XIE Jilin, et al. Microstructure and mechanical properties investigation of AZ31 thick plate magnesium alloy double-shield friction stir welding joint[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2022, 65(21): 38–44, 53.
- [26] MIAH M H, CHAND D S, MALHI G S. Friction stir welding on temperature field for aluminum alloy based on combined HSM[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 56: 675–680.
- [27] CONG S, LI N, ZHU Z, et al. A comparative study of conventional, dynamic rotation and heat-assisted friction stir welding of Ti–6Al–4V plates to reduce welding defects[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2024, 323: 118217.
- [28] SALIH O S, OU H G, SUN W. Heat generation, plastic deformation and residual stresses in friction stir welding of aluminium alloy[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2023, 238: 107827.
- [29] QIN D Q, FU L, SHEN Z K. Visualisation and numerical simulation of material flow behaviour during high-speed FSW process of 2024 aluminium alloy thin plate[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 102(4): 1901–1912.
- [30] YANG C L, DAI Q L, SHI Q Y, et al. Flow-coupled thermo-mechanical analysis of frictional behaviors at the tool-workpiece interface during friction stir welding[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, 79: 394–404.
- [31] SU H, WU C S. Numerical simulation for the comparison of thermal and plastic material flow behavior between symmetrical and asymmetrical boundary conditions during friction stir welding[J]. *Advances in Manufacturing*, 2023, 11(1): 143–157.
- [32] 北京索德瀚智能科技有限公司. 双面焊产业化应用[EB/OL]. (2023–01–30)[2024–03–05]. <https://www.solidwel.com/sys-nd/52.html>.
- Beijing Solidwel Intelligent Technology Co., Ltd. Industrialized application of double-sided friction stir welding[EB/OL]. (2023–01–30)[2024–03–05]. <https://www.solidwel.com/sys-nd/52.html>.
- [33] TWI. TWI demonstrates breakthrough in FSW of Steel[EB/OL]. (2023–05–25)[2024–03–05]. <https://www.twi-global.com/media-and-events/press-releases/2023/twi-demonstrates-breakthrough-in-fsw-of-steel>.
- [34] MATSUSHITA M, YAMAGISHI D, IGI S, et al. Development of double-sided friction stir welding of advanced high strength steel sheets[J]. *Welding in the World*, 2023, 67(3): 561–571.

## Synergistically Double-Sided Friction Stir Welding

LI Wenya<sup>1</sup>, TANG Yishuang<sup>1</sup>, ZOU Yangfan<sup>1</sup>, WANG Weibing<sup>2</sup>

(1. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Beijing Solidwel Intelligent Technology Co., Ltd, Beijing 100089, China)

**[ABSTRACT]** Synergistically double-sided friction stir welding (SDS–FSW) is a significant variant of friction stir welding (FSW). The problems of large deformation and time-consuming of traditional FSW are greatly suppressed by SDS–FSW. SDS–FSW has prompted considerable scientific and technological interests due to its advantages in welding large-sized and thick plates or profiles. At present, the research and application of SDS–FSW are still in the initial development stage, and relevant research results are mainly limited to 6061 aluminum alloy. This paper provides an overview of this new technology, including its development history, technical characteristics, typical research results and application prospects. The aim is to provide a reference for the further development and engineering application of SDS–FSW.

**Keywords:** Friction stir welding (FSW); Synergistically double-sided FSW (SDS–FSW); Aluminum alloy; Microstructure; Mechanical property (责编 逸飞)