DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2020.06.001

# 搅拌摩擦焊技术的研究进展

武凯1,贾贺鹏1,孙宇1,张华德2,林永勇2,胡峰峰2

(1. 南京理工大学 机械工程学院,江苏 南京 210094; 2. 航天工程装备(苏州)有限公司,江苏 苏州 215200)

摘 要:搅拌摩擦焊(FSW)是一种新型固相连接技术,主要用于常规熔焊难以焊接的铝合金及 其他合金的连接和加工中。FSW 具有焊接强度高、残余应力低、焊接效率高、成本低和绿色环 保等优点,被广泛应用于航空航天、船舶、轨道交通、汽车及能源等工业领域。概述了 FSW 技 术的发展和现状,对 FSW 相关机理、工艺、数值模拟技术、设备以及应用进行了综述。 关键词:搅拌摩擦焊;机理;工艺;数值模拟;设备 中图分类号:TG453\*.9 文献标志码:A 文章编号:1671-5276(2020)06-0001-09

### **Research Progress of Friction Stir Welding Technology**

WU Kai<sup>1</sup>, JIA Hepeng<sup>1</sup>, SUN Yu<sup>1</sup>, ZHANG Huade<sup>2</sup>, LIN Yongyong<sup>2</sup>, HU Fengfeng<sup>2</sup>
(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
2. Aerospace Engineering Equipment (Suzhou) Co., Ltd., Suzhou 215200, China)

Abstract: Friction stir welding (FSW) is a new type of solid phase connection technology, mainly used in the connection and processing of aluminum alloys and other alloys, in which it is difficult to weld by conventional fusion welding. FSW is characteristic of high welding strength, low residual stress, high welding efficiency, low cost and green environmental protection. It is widely used in industrial fields such as aerospace, shipping, rail transit, automobiles and energy. This article summarizes the development and current status of FSW technology, and overviews the FSW related mechanism, process, numerical simulation, equipment and applications.

Keywords: friction stir welding; mechanism; process; numerical simulation; equipment

# 0 引言

搅拌摩擦焊(friction stir welding, FSW)是英国焊接研究所(The Welding Institute, TWI)在 1991 年发明的一种 新型固相连接技术<sup>[1]</sup>。FSW 的工作温度一般低于被焊材 料熔点的 80%,可有效避免焊接过程中产生的金属氧化 和硬化过程中可能出现的凝固裂纹、收缩和孔洞现象,降 低焊接残余应力和残余变形<sup>[2]</sup>。该项技术可以进行同种 金属或异种金属的焊接,尤其适用于铝合金及镁合金的焊 接,并能得到较高质量的焊接接头。与传统的熔化焊接技 术相比,FSW 具有许多明显的优势<sup>[3]</sup>。它的特点包括焊 接效率高、焊接过程成本低、焊接接头强度及可靠性高、焊 接变形小、缺陷率低、绿色环保及适用于传统熔焊不可焊 的铝合金等材料,为铝、镁等轻合金在工程结构制造领域 的广泛应用开辟了新途径<sup>[3-4]</sup>。本文从 FSW 技术的机理 分析、工艺技术、数值模拟、设备和应用等方面进行综述, 论述 FSW 技术的最新研究和应用进展。

## 1 机理分析

## 1.1 工作原理

如图 1 所示,在 FSW 过程中,高速旋转的搅拌工具 (搅拌头)插入待焊工件的接缝处,并沿着焊缝向前移动, 通过搅拌针和轴肩对工件的摩擦产生足够的热量,使其周 围被焊金属达到黏塑性状态,在热和塑性流动的共同作用 下,利用此黏塑性流动消除自由接触表面,形成致密无缺 陷的焊缝组织,实现材料的连接。

#### 1.2 微观组织

分析 FSW 接头的组织演变和微观结构对研究接头力 学性能、材料流动行为及优化焊接参数有重要的意义。根 据微观组织演化方式的不同,在截面不同焊接区域的宏观 展示截面图<sup>[5]</sup>上可将 FSW 接头由中心向外划分为 4 个不 同的区域<sup>[6]</sup>,即搅拌区/焊核区(stir zone, SZ or nugget

基金项目: 江苏省科技成果转化专项项目(BA2019029); 苏州市重点研发产业化重点项目(SGC201914)

第一作者简介:武凯(1972—),男,山西盂县人,教授,工学博士,研究方向为先进机械装备的设计与制造技术、CAD/CAE/CAM 技术、机械装备的可靠性设计与制造技术等。先后承担了国家重大科技专项、江苏省重大成果转化、江苏省产学研联合创新基金、江苏省自然科学基金、江苏省六大人才高峰计划、江苏省高端装备赶超工程等多项国家、省部级项目。目前已发表论文 80 多篇,SCI、EI 收录 20篇;获国家科技进步二等奖 1 项,省部级科技进步一等奖 3 项、二等奖 3 项、三等奖 2 项;以第一发明人获授权发明专利 10 项;出版专著 1 部。



图 1 搅拌摩擦焊的工作原理图

zone,NZ)、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),如图2所示。其中焊接构件在HAZ只受到 焊接热循环作用,而TMAZ和NZ受到热和塑性变形共同 影响。



图 2 FSW 接头微观结构区域的典型宏观图

焊核区内晶粒结构的演化主要与材料流变及动态再 结晶行为有关,再结晶包含连续动态再结晶和几何动态再 结晶,析出相强化型材料还会在此过程中发生第二相粒子 的形核、析出、溶解和长大<sup>[7]</sup>。在 NZ 内,由于塑性应变和 应变率很高,会诱发连续动态再结晶和几何动态再结晶的 发生。非连续动态再结晶通常在铝合金中并不常见,这是 由于铝合金属于高强度铝合金,其发生动态回复现象非常 明显。虽然如此,但是在 NZ 内过量的热输入条件下会有 可能发生非连续动态再结晶[8]。在某些金属中存在着孪 晶诱导动态再结晶,其被认为是与孪晶内部储能及应力状 态有关,具体形核方式存在多种机制,如孪晶相互交割形 核、次级孪生形核、孪晶内小角晶界形核等。综上可知,接 头在 NZ 内的微观结构由细化的等轴晶组成<sup>[9-11]</sup>。TMAZ 的微观结构演化主要是动态回复,因为接头在该区域内经 历的温度和塑性变形的量级不足以满足发生再结晶。该 区是 NZ 与 HAZ 之间的过渡区域,内部的晶粒在一定的晶 粒取向上被拉长。HAZ 通常受温度作用的影响导致在焊 后微观结构(晶粒、析出相)发生了粗化。此外,接头在 NZ沿构件厚度方向,其微观结构也会发生变化,这是受到 搅拌头轴肩影响的区域和搅拌针作用的区域表现出的差 异性。由于受不同搅拌针尺寸的影响,NZ 在构件厚度方 向的温度和等效应变分布也显得不同<sup>[9-12]</sup>。PRANGNELL P B等<sup>[13]</sup>在 2195 铝合金 FSW 焊接过程中,利用急停技术 分析了接头金属材料的流动规律,揭示了焊接过程中在搅 拌针上增加螺旋可提升材料的塑性流动,从而提升接头力 学性能。CHEN Z W 等<sup>[14]</sup>在 5083 铝合金 FSW 焊接过程 中采用急停技术研究接头 NZ 的材料流动行为,发现搅拌 刀具周围的塑化金属跟随着搅拌针的旋转发生移动。

### 1.3 作用力

FSW 过程中的作用力影响接头的形成,对过程作用 力的研究,有助于分析接头成形规律并找到提高接头质量 的方法。过程作用力主要包括轴向力、沿搅拌头移动方向 的纵向力以及垂直于搅拌头移动方向的横向力。3个力 应在安全范围内,才能保证加工出无缺陷的焊缝,并延长 刀具寿命。

SIMAR A<sup>[15]</sup>研究表明,轴向力对生热和焊缝熔深有 重要的影响。一般而言,为了获得完全的熔透和无缺陷焊 缝,对于高熔点温度材料,较高的轴向力是必要的<sup>[16]</sup>。王 希靖等<sup>[17]</sup>研究了搅拌摩擦焊接中搅拌头前进阻力(纵向 力)的变化规律,认为焊接同种材料时,前进阻力的大小 与行进速度的大小以及对应的压入量和所使用材料的尺 寸都有着正比例的关系;当转速增加时,前进阻力会先增大 后减小;对比研究不同的焊接材料,材料硬度和前进阻力有 直接关系,硬度越高,前进阻力越大。CRAWFORD R<sup>[18]</sup>研 究了 FSW 过程中的轴向力,认为轴向力和 FSW 过程中的 转速存在一定的关系。ARORA A 等<sup>[19]</sup>模拟了 FSW 过程 中的转矩及输出功率,指出多面形状的搅拌针能产生较小 的力,对指导设计人员如何选择一个合适的轴肩直径和搅 拌针截面具有重要意义。

现有文献研究主要集中在焊接工艺参数和刀具几何 参数对轴向力和横向力的影响,并通过调整工艺参数改变 轴向力和横向力的大小进行在线检测和控制,进而提升焊 接质量的在线指标。然而,在宽泛的工艺参数范围内,同 时测量横向力、轴向力和纵向力并分析它们的周期性变化 和焊接材料性能的工作却鲜有报道。

#### 1.4 疲劳断裂

焊接接头疲劳性能的影响因素主要有接头的表面质量、焊缝区的微观组织、残余应力、焊接工艺参数、外部环境及表面处理技术等。深入了解 FSW 对焊接接头疲劳寿命的影响,对 FSW 的工程应用具有重要意义。

刘奋军等<sup>[20]</sup>采用 FSW 对厚度为 2 mm 的 2099-T83 与 2060-T8 Al-Li 合金进行搭接。在接头焊缝区可观察 到明显的结合界面,焊缝区显微硬度低于母材;搭接接头 均在底部母材 2060-T8 侧的 TMAZ 与 NZ 的过渡区断裂, 断裂特征为韧、脆混合断裂。康举等<sup>[21]</sup>发现 2219-T8 铝 合金 FSW 接头在拉伸过程接头变形主要发生在 TMAZ, 在相同的应力水平下,TMAZ 表面的钝化膜更易破裂,甚 至会有微裂纹出现。房湛等<sup>[22]</sup>研究了 2195-T8 与 2219-T6合金薄板接头组织对焊缝性能的影响。随着焊 接速度的提高,接头力学性能相应提高;以2195为前进侧 时的接头其力学性能更优越,而接头的断裂位置始终位于 2219 侧, 与前进侧材料无关。SINGH R K R 等<sup>[23]</sup> 研究了 在3种冷却环境(即自然空气、水和液氮)中,以不同的速 度对 Al-Mg-Cr 铝合金进行 FSW。结果表明,水冷时疲劳 裂纹扩展速率较低,液氮冷却时焊核区氧化物的存在使疲 劳裂纹扩展速率显著增加。ZHANG L 等<sup>[24]</sup>研究了搅拌摩 擦焊接 6061-T6 铝合金的微观组织和力学性能,评估了缺 口位置对冲击和疲劳裂纹扩展行为的影响。结果表明,铝

合金基体中的颗粒会阻碍疲劳裂纹的扩展,微观结构的不均匀性和裂纹闭合是导致疲劳裂纹扩展速率波动的主要原因。

DAS J 等<sup>[25]</sup>研究各种工艺参数(刀具几何形状、刀具 转速和焊接速度)与疲劳裂纹扩展的关系以及如何控制 这些参数,从而获得具有最大抗裂性的最佳焊接质量。 SALIH OS 等<sup>[26]</sup> 通过控制两个重要的工艺参数(刀具转 速和焊接速度),建立了 Al-Mg-Si 合金在大范围焊接温 度和塑性变形下焊接过程中微观组织演变的相互作用关 系。研究发现,FSW 接头的疲劳性能取决于晶粒尺寸,较 小晶粒尺寸 FSW 接头的疲劳寿命显著提高。RANJAN R 等<sup>[27]</sup>通过小尺寸试样测试和断裂力学分析,研究了 FSW 单面铝对接接头的疲劳行为。结果表明,FSW 接头的疲 劳性能优于典型的弧焊接头,并且在弯曲载荷下,与焊接 的根部或底部相比,焊接的顶部具有更好的疲劳性能。 GAO F Y 等<sup>[28]</sup>使用紧密拉伸韧性试样研究了 FSW 焊接 钛合金接头的断裂韧性,断裂韧性稍微降低至母材断裂韧 性的90%。断裂面主要为韧性断裂机制,韧窝较多;裂纹 扩展路径平直,并伴有沿晶和穿晶断裂;搅拌区断裂韧性 的降低主要与微观组织和组织结构有关。徐韦锋等<sup>[29]</sup>研 究了不同外加总应变幅条件下 FSW 接头沿板厚方向分层 切片的疲劳性能。发现母材疲劳寿命高于 FSW 接头,与 接头中部和底部切片相比,上部疲劳寿命较低。随转速的 升高,疲劳寿命降低,焊速对其影响较小。王晨等[30]以 SiCp/6092Al 复合材料为研究对象,对表面未打磨的接头 和经过打磨抛光后的光滑表面接头的疲劳性能进行深入 研究。结果表明,与未打磨试样相比,经过打磨抛光后的 接头光滑表面试样的疲劳极限提高了 40~65 MPa,且高焊 速下的光滑试样表现出更高的疲劳极限(205 MPa),光滑 表面接头在疲劳测试时均在最低硬度区及其附近区域发 生断裂。

# 2 工艺技术

## 2.1 工艺参数分析与优化

FSW 焊接工艺参数主要包含刀具的旋转速度、焊接 行进速度、倾角、下压量以及冷却环境等。不同的焊接参 数组合能够影响焊接过程热循环、刀具受载状态以及材料 流变行为。各种参数不是相互独立的,通过优化的参数组 合能够得到无缺陷的高质量焊缝。在其他参数保持不变 的条件下,当刀具的旋转速度较低时,刀具与焊接材料产 生的热量不足以使材料达到塑化状态,无法将未塑化材料 进行固相连接,导致焊接缺陷形成;通过提高刀具的旋转 速度,使有效热输入量增大,刀具四周塑性及材料流动效 果良好,焊接缺陷逐渐消失,形成良好的成形焊缝。在给 定刀具几何条件下,热输入和材料流动的调节主要由刀具 的旋转速度、焊接行进速度、倾角和下压量等控制。

刘奋军等<sup>[31]</sup>探讨了 6061-T6 铝合金薄板的高转速 FSW 工艺,揭示高转速对铝合金薄板对接接头微观组织 和力学性能的影响规律。结果表明,高转速焊接 6061-T6 薄板时,焊缝表面成型良好,焊缝各区域组织呈连续均匀 过渡。董继红等<sup>[32]</sup>研究了 2024 铝合金薄板的 FSW 微观 组织和力学性能特征。结果表明,在旋转速度为 800 r/min、焊接速度为 300 mm/min 时,接头抗拉强度、屈 服强度和伸长率分别达到 461 MPa、332 MPa 和 14.6%,接 头强度可达母材的 94.8%,屈服强度可达母材的 87.5%。 杨超等<sup>[33]</sup>对 2 mm 厚的退火态 7B04 铝合金薄板进行 FSW 对接焊接,分析了焊接参数对焊接质量、微观组织和力学 性能的影响。结果表明,通过控制焊接参数,可获得良好 的焊接质量,接头强度系数达 100%;焊核区生成细小等 轴晶,母材晶粒尺寸约为 300 µm;在约 400 ℃时超塑性变 形行为消失。IQBAL P 等<sup>[34]</sup>通过建立 FSW 的刚黏塑性 模型,采用点跟踪法对焊接缺陷进行了预测,并与实验结 果进行了比较。当切入深度为 0.3 mm 时,可与刀具肩部 的界面充分接触,并产生良好的焊接效果。

SADOUN A M 等<sup>[35]</sup>研究发现,使用高销侧面积比 (29.83%)的半球销,可得到抗拉强度高、晶粒细小的接 头。MANEIAH D 等<sup>[36]</sup> 采用 H13 工具钢对 3 mm 厚的 6061-T6 铝合金进行 FSW。通过测量转速、倾角、进给量 等工艺参数来确定 FSW 工艺参数对焊接接头拉伸性能的 影响。当转速为1400 r/min、倾角为 0° 和进给量为 100 mm/min 时,可获得 191 MPa 的最高抗拉强度,延伸率 10%表示焊缝具有韧性。AHMED K E 等<sup>[37]</sup>研究了 6082 铝合金在 FSW 过程中,刀具转速分别为 500 r/min、710 r/min、1000 r/min 和 1400 r/min 时,硬度和抗拉强度的变 化。使用 ANOVA 法和响应面法对 FSW 工艺参数进行了 优化,确定了接头抗拉强度的最佳值。KADAGANCHI R 等<sup>[38]</sup>建立了具有工艺参数和刀具几何参数的数学模型, 预测了 FSW 铝合金(AA2014-T6)的屈服强度、抗拉强度 和塑性响应,采用响应面法建立回归模型预测响应。 SHASHI Kumar S 等<sup>[39]</sup>使用响应面法开发的实验设计方 法(Box-Benkhen),对 AISI 316L 不锈钢薄板进行了对焊 结构的研究。当刀具转速为 597 r/min、焊接速度为 74 mm/min、下压力为 13 kN 和刀具倾角为 1.5°时,可以得 到最大抗拉强度为 604 MPa 的接头。RAJENDRANA C 等<sup>[40]</sup>利用实验设计、方差分析、响应图和轮廓图等统计工 具优化 FSW 工艺参数以获得最大抗拉强度。当刀具转速 为 900 r/min, 焊接速度为 110 mm/min、轴肩直径为 12 mm、刀具倾角为1.5°时,接头的最大拉伸剪切断裂载荷 可达 12.76 kN。

刀具的倾角是指刀具轴线与焊接工件表面法线的夹 角。焊接时,刀具通过向后方倾斜一定角度使得轴肩端面 后沿的部分相比于前沿部分压入工件更深,这样材料在从 刀具前方运动到后方的过程便会受到轴肩向下的锻压作 用而结合得更加紧密。COLEGROVE P A 等<sup>[41]</sup>研究了刀 具 0°和 2.5°倾斜时焊接所需压力,发现刀具 2.5°倾斜时的 焊接质量比较理想。RAJENDRAN C 等<sup>[42]</sup>研究了搅拌头 倾角对 FSW 铝合金(AA2014-T6)焊接强度的影响。当搅 拌头倾角为 1°~3°时,可获得无缺陷的焊接接头;当倾角 为 2°时,可获得具有最大剪切强度(14.42 kN)和显微硬度 (HV132)的接头。MAHTO R P 等<sup>[43]</sup>采用 X 射线显微计 算机断层扫描和金相分析对焊接缺陷进行了定性和定量 评估,发现倾角为 1°的焊接减少了表面和内部缺陷。所 以,倾角一般要求大小适中,倾角太大则容易导致轴肩端 面前沿与材料接触不够,难以带动材料流动;而端面后沿 则压入材料太深,材料明显挤出。倾角太小则容易将材料 向四周挤出形成飞边,后方材料压实效果不佳而易于出现 隧道、孔洞等缺陷。

刀具的位置状态也会严重影响焊接质量。刀具偏心 是由于刀具相对于主轴中心偏移而引起的,较小的偏移会 导致 FSW 期间的偏心运动<sup>[44]</sup>。SHAH L H 等<sup>[45]</sup>研究了 刀具偏心对 AA6061 铝合金 FSW 的影响。结果表明,刀 具偏心增加了焊核区的物料流动;当工具偏移 0.2 mm 时, 接头拉伸强度和伸长率并未受到影响。SHAH L H 等<sup>[46]</sup> 研究了刀具偏心对 AA6061-T651 铝合金 FSW 的影响。 结构特征表明,焊缝的表面粗糙度增加,而搅拌区域中的 材料流动和混合随着刀具偏心的增加而增强。

#### 2.2 异种材料焊接工艺

由于异种材料的力学性能差异,给连接技术带来了更 大的挑战。近年来,许多学者应用 FSW 技术对异种材料 进行搅拌摩擦焊研究。GHOSH M<sup>[47]</sup>研究了 FSW 工艺参 数对 A356 铝合金与 6061-T6 铝合金的焊接力学性能的 影响。JAGATHESH K 等<sup>[48]</sup>研究了 FSW 工艺参数对 AA2024 和 AA6061 铝合金焊接性能的影响。通过控制 FSW 的旋转速度、焊接速度和刀具销直径,进行了设计的 FSW 实验.获得了高强度的焊接接头。 SHUNMUGASUNDARAM M 等<sup>[49]</sup>采用 FSW 对不同铝合金 板材 AA6063 和 AA5052 进行了焊接,并使用 Taguchi L9 正交试验设计对工艺参数进行了优化,确定最佳工艺参数 以最大限度地提高焊接接头的抗拉强度。PRASAD M V RD 等<sup>[50]</sup> 研究了 FSW 焊接厚度为 5 mm 的 AA5083 和 AA6061 钢板,根据 Taguchi L9 方法的正交阵列进行实验, 研究了焊接试样的力学性能的伸长率和硬度。张鑫等[51] 通过添加中间层材料 Zn 抑制 TC4 钛合金和 2A14 铝合金 异种金属焊缝中产生金属间化合物,研究了工艺参数对焊 缝成形、接头抗拉强度的影响。结果表明,当焊接速度为 75 mm/min、旋转速度为 375~950 r/min、偏移量为 2.5 mm 时,可获得表面成形良好的焊接接头。HOU W 等<sup>[52]</sup>研究 了刀具偏置对 6061 铝合金与工业纯铜在 FSW 中的不同 对焊工艺。当刀具偏置从2mm减小到0mm时,焊接接头 的极限抗拉强度增加,而当偏移量>1.6mm时,焊接接头 的极限抗拉强度急剧下降。GUO Y N 等<sup>[53]</sup>研究了焊接工 艺参数对 2024-T3 和 7075-T6 铝合金 FSW 焊接接头动态 拉伸性能的影响。发现 HAZ 的屈服应力高于 SZ 和 TMAZ 的屈服应力。MSOMI V 等<sup>[54]</sup>研究了 1050-H14 和 5083-H111 铝合金 FSW 接头的质量。利用半自动铣床进 行焊接,将焊接接头与母材进行对比分析,并且讨论了微 观组织观察结果与接头力学性能的关系。

镁、钛及其合金 FSW 一直是研究者和技术人员面临的挑战。AONUMA M 等<sup>[55-57]</sup>通过将探针插入 Mg 合金板 中并在 Ti 板侧稍微偏移 0.5 mm,可以成功焊接厚度为 2 mm 的镁合金板和钛板。接头的平均抗拉强度为 237 MPa,约为镁合金板的 69%,断裂主要发生在镁合金板 的搅拌区,部分发生在接头界面。SIVAM S P S S 等<sup>[58]</sup>采

用灰色关联度分析法研究了 FSW 过程中转速、焊接速度、 刀销底径和刀具轮廓对 Mg/Ti 合金 FSW 响应的影响,并 用方差分析法确定了影响 FSW 响应的最重要因素是焊接 速度。CHOI J 等<sup>[59]</sup>在纯 Mg 和纯 Ti 之间插入铝箔进行 Mg/Ti 不混溶体的异种 FSW 研究。LI Q H 等<sup>[60]</sup> 采用 FSW 对 Mg/Ti 异种合金进行了塔接焊接,使刀具稍微地 渗入底部 Ti 合金。对接头组织、力学性能和断裂行为进 行了系统的研究。FSW 技术为获得高质量的 Mg/Ti 异种 合金接头提供了一种有效的方法。

#### 2.3 搅拌头

搅拌头是搅拌摩擦焊设备中最重要的部件之一,由轴 肩和搅拌针两部分组成,对焊接接头质量有重要影响。针 对搅拌针的研究从很早就开始了,但对搅拌针几何特征的 总体认识还不够完善,其对焊接过程中的产热以及与工件 材料之间的相互作用仍不明晰。

RAIR 等<sup>[61]</sup>从刀具的几何结构、材料选择、微观结 构、承载能力、失效机理和工艺经济性等几个重要方面的 研究进展进行了评述,认为搅拌头的发展主要集中在带螺 纹的搅拌头和带3个沟槽的搅拌头这两个方面。搅拌针 的几何形状被认为是控制材料流动和热量输入以及焊接 质量的主要参数之一,通过优化搅拌头几何特征可以促进 材料流动和提高焊接质量。SCIALPI A 等<sup>[62]</sup>研究了 3 种 不同的轴肩几何形状(旋涡、内凹、平面)对铝合金 6082 搅拌摩擦焊接焊缝微观组织和接头力学性能的影响。 PATEL V 等<sup>[63]</sup>选取截面形状分别为正四边形、正五边形 和正六边形的搅拌针对 7075 铝合金进行搅拌摩擦焊接工 艺试验,只有使用正四边形搅拌针时在焊核区获得了均匀 细小的微观组织。FELIX XAVIER MUTHU M 等<sup>[64]</sup>研究 了3种不同外形的搅拌头(螺纹搅拌头、平锥形搅拌头、锥 针形搅拌头)对材料显微结构、显微硬度和拉伸性能的影 响。在这3种不同外形的搅拌头中,平锥形搅拌头能产生 无缺陷搅拌区,并得到力学性能良好的接头,其屈服强度 为101 MPa,拉伸强度为106 MPa,焊接效率为68%。SU H 等[65]使用3种不同形状搅拌针,通过分析搅拌头的受力 情况,得出搅拌头所受前进阻力和搅拌针形状之间的关系 式,当使用多边形搅拌针时搅拌头的前进阻力会显著减 小。HOU W T 等[66] 设计了一种具有双销结构的新型搅 拌工具,并将其用于异种铝合金 AA2024 和 AA6061 对接 板的焊接。对于无缺陷接头,双销工具比单销工具在接头 截面上的显微硬度分布更均匀。

## 3 数值模拟

数值模拟技术在熔化焊接的研究中已经得到了广泛 的应用。同样,国内外的研究者也将数值模拟技术引入 FSW 过程的研究。目前,计算固体力学(computational solid mechanics, CSM)方法和计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)方法被广泛应用于 FSW 过程 的数值仿真。CFD 方法主要用于模拟焊接过程中搅拌头 周围材料的流动形式和温度场的分布情况,而 CSM 方法 则可以预测焊接温度场、焊接过程中应力和应变的变化过 程、残余应力分布和残余变形。对于 FSW 过程的数值模 拟是非常复杂的,主要集中在温度场、应力变形和金属塑 形流动分析以及热-流-力耦合的研究,或者其中两个耦 合模型的研究。这些数值模型主要有瞬态传热模型、材料 流动模型、顺序热力耦合模型和完全热力耦合模型。

焊接过程中温度场的分布形式是 FSW 的一个重要研 究内容。尽管焊接温度低于材料的溶点,但是依然会促使 材料发生相变,因此研究焊接过程中温度的变化历程至关 重要。近年来,在温度场仿真方面,有些学者通过热-流-力三者的耦合建立了模型,在模型中加入了动态变化的摩 擦力,使仿真结果更贴近实际。ZHAO P C 等<sup>[67]</sup>建立计算 流体动力学二维模型模拟 6061 铝合金的 FSW 过程,发现 焊缝两侧的温度分布并不对称,但具有相同的变化趋势, 且前进侧的峰值温度比返回侧高约 10K。GHATE N D 等<sup>[68]</sup>提出了一种二维数值方法来研究 FSW 过程中刀具 周围的材料流动以及孔洞的形成机理。FSW 过程中的应 力和应变足以使夹杂处的孔洞形核和长大。武传松<sup>[69]</sup>根 据搅拌头与工件界面上的受力特点,建立了热流耦合模 型,对FSW 各个阶段的温度场、流场和产热过程进行了模 拟,并分析了3种常用的搅拌头的产热情况。张昭等<sup>[70]</sup> 在对板材变形进行模拟时,发现了低塑性的流动区在搅拌 头的后方且接近底部,前进侧和返回侧的温度梯度明显不 同,前进侧的温度梯度更大。TANG J M 等<sup>[71]</sup>建立了基于 CFD 的改进三维模型以预测异种铝合金 AA2024 和 AA7075的搭接 FSW 期间的温度分布。在前进侧和返回 侧存在明显的不对称温度分布,每个观察点的温度分布和 变化都不同,观测点的温度迅速上升,但下降缓慢。 COLEGROVE P A<sup>[41]</sup>利用 FLUENT 软件对 FSW 过程进行 了三维动态模拟。该模型中引入了带螺纹的搅拌头,对搅 拌头旋转速度、焊接速度等工艺参数与焊接温度场、材料 迁移行为之间的关系进行了分析。BUFFA G 等<sup>[72]</sup> 通过 完全热力耦合三维模型研究搅拌头形状与焊接速度对焊 接接头质量的影响,发现可以通过调整搅拌头形状和焊接 速度来提高铝合金焊接接头的质量。在焊缝上部的热量 主要来自于搅拌头轴肩的摩擦产热,而焊缝底部的热量主 要来自于材料的塑性变形产热,搅拌头转速和焊接转速会 影响焊接过程中的温度分布及材料流动。PADMANABAN R 等<sup>[73]</sup>建立了基于 CFD 的数值模型,预测了异种铝合金 AA2024 和 AA7075 的 FSW 过程中的温度分布和材料流 动。结果表明,焊接板中的峰值温度随刀具旋转速度和轴 肩直径的增加而升高,而峰值温度随焊接速度的增加而降 低:增加刀具旋转速度和轴肩直径会增加物料流动,而增 加焊接速度会减少搅拌区的物料流动。

焊接过程中材料的流动伴随着显著的应力变化,导致 接头出现残余应力和残余变形,从而影响接头的力学性 能。通过 FSW 的数值仿真对深入研究焊接残余应力分布 和焊接残余变形有非常重要的意义。KHANDKAR M Z H 等<sup>[74]</sup>通过建立顺序热力耦合模型来研究焊接过程,发现 残余应力是由于温度循环而引起的,表明顺序热力耦合有 限元模型可以成功地模拟焊接过程。SELVAMANI S T 等<sup>[75]</sup>通过加载移动热源的方法对 6061-T6 铝合金的温度 场进行了分析,发现搅拌头前进侧的温度比返回侧高,且 最高温度在前进侧。RIAHI M 等<sup>[76]</sup>建立了 FSW 三维数 值模型,研究焊接速度对搅拌头与构件之间摩擦生热和残 余应力的影响。结果表明,搅拌头轴肩下方的材料具有较 大的温度梯度,并且随着焊接速度的增大残余应力逐渐增 大。JAMSHIDI A H 等<sup>[77]</sup>建立了不同铝合金焊接的数值 模型,研究不同焊接参数对温度和残余应力的影响。研究 发现,搅拌头转速对拉伸残余应力区域有较大的影响,而 焊接速度主要影响横向残余应力的分布。

通过数值模拟的方式可以优化工艺参数,并根据模拟 结果确定搅拌头的尺寸及加工标准,对提高焊接质量有很 重要的作用。AHMAD K N 等<sup>[78]</sup>对 FSW 过程的各个阶段 (插入、停留和移动)进行了慢、快工艺参数的模拟,并与 以往在同一钢种上的试验结果进行了比较。在每个模型 中,发现焊缝形状和焊缝表面飞边与先前的实验结果非常 接近。SALLOOMI K N 等<sup>[79]</sup> 采用有限元方法对 6061-T6 铝合金 T 型接头 FSW 过程进行了完全热力耦合模拟焊接 过程的3个阶段(插入、停留和移动)。计算结果表明,随 着刀具的推进,最大应力逐渐由蒙皮部分向纵梁部分移 动,摩擦耗散能是产生 FSW 所需热量的主要原因。 BOUKRAA M 等<sup>[80]</sup> 通过对典型铝锂合金 AA2195-T8 最佳 工艺条件的预测,结合三维瞬态传热计算的优化来改善工 艺参数。LONG L 等<sup>[81]</sup>建立了考虑倾角的三维热力耦合 有限元模型。模拟结果显示,焊缝在0°倾角条件下出现 虫孔缺陷,而在2°倾角条件下未观察到虫洞缺陷;当刀具 倾角为 2°时,刀具后部材料的峰值温度和压缩法向应力 均升高。ZHANG S 等<sup>[82]</sup>提出了几何模型和不完全接触 边界条件的 CFD 模型,以研究刀具倾角对 FSW 过程中传 热传质的影响;根据仿真结果,得出了刀具倾角对传热传 质的3种影响。

## 4 设备

国内外各大工业集团和研究机构都在搅拌摩擦焊设 备方面进行了大量的研究和开发工作。

1999年秋季,位于英国布里斯托尔(Bristol)附近的空 中客车公司(Airbus)从哈利法克斯(Halifax)的克劳福 德·斯威夫特(Crawford Swift)推出了一台 Powerstir 搅拌 摩擦焊设备,用于制造飞机机翼和机身的焊接。自 2000 年以来,Powerstir 搅拌摩擦焊设备为广泛的工程应用而开 发,它不仅能够满足结构刚度和载荷感应的要求,而且可 以承受更大的焊接载荷,从而确保精确的力控制和最小的 挠度。英国精密技术集团(Precision Technologies Group, PTG)已经将 Powerstir 搅拌摩擦焊设备的性能提升了一个 新的高度,使用 PTG 固定销工具成功焊接了 3 mm 和 8 mm 厚度的航空级合金钢和航空航天级钛合金,在一系列具有 挑战性的配置(2 mm~35 mm 的铝合金)中也获得了优异 的效果。它的主要特征包括:CNC 控制、生产监控、力控 制、焊接温度监控、联合跟踪、气体保护、机器夹具、数据采 集系统和高度感应。

美国通用工具公司(General Tool Company, GTC)一 直处于搅拌摩擦焊技术的最前沿,是顶级搅拌摩擦焊公 司之一,主要设计和制造 AccuStir 系列搅拌摩擦焊设备, 如图 3 所示。使用 GTC 的专利技术来定制设计搅拌摩 擦焊设备,可以满足特定行业需求。制造的带有真空夹 紧装置的搅拌摩擦焊设备,主要用于航天运载火箭筒体 的焊接。



图 3 AccuStir 型搅拌摩擦焊设备

美国制造技术公司(Manufacturing Technology Inc., MTI)的搅拌摩擦焊接工艺开发和零件生产正在许多行 业产生巨大影响。MTI 在全球范围内设计、制造和安装 了搅拌摩擦焊设备,提供了世界级的搅拌摩擦焊接功能 和一系列内部增值服务,包括焊接接头设计、工艺参数开 发以及焊前和焊后处理。主要包括 RM 系列、LS 系列、 GG 系列、双头搅拌摩擦焊。LS1 双头搅拌摩擦焊设备是 世界上最长的搅拌摩擦焊设备之一,如图 4 所示。它用 于连接各种宽度和长度不超过 55 in 的平板、板材、薄板 或挤压件。双头能力允许同时进行顶部和底部焊接,从 而简化了生产。



图 4 LS1 双头搅拌摩擦焊设备

邦德科技(BOND Technologies)从紧凑型到大型多轴 和多主轴系统,提供全系列的搅拌摩擦焊设备。主要包括 PM 系列、RM 系列、LS 系列、GG 系列、特殊用途设备和补 偿点焊。最通用的设备系列是 GG 系列,该系列提供固定 工作台和导轨配置,非常适合处理大批量生产、复杂的几 何形状和许多其他应用。

瑞典伊萨公司 (Elektriska Svetsnings - Aktiebolaget, ESAB)制造的搅拌摩擦焊设备有标准化的 Legio、工程定 制的 SuperStir(如图 5 所示)和功能强大的搅拌摩擦焊接 机器人 Rosio(如图 6 所示)。Legio 拥有的模块化系统可 组装适应的焊接工作站,让绝大多数搅拌摩擦焊接应用的 需求成为可能;SuperStir 属于定制设备,设计符合客户对 全面自动化生产的要求;Rosio 能够灵活地在三维工作空 间的任意方向上焊接复杂的结构,在具有挑战性的 FSW 新应用中增加了使用的可能性。



图 5 SuperStir 型搅拌摩擦焊设备



图 6 Rosio 型搅拌摩擦焊接机器人

日立(Hitachi)开发设计有一维 FSW 设备、二维 FSW 设备、三维 FSW 设备、钢铁用 2D-FSW 设备、定制式 FSW 设备和 FSW 机器人设备。焊接设备具有刀具跟踪系统、自动回缩机头和数据采集系统等功能。

作为精密力和运动控制系统的全球领先提供商以及 尖端 FSW 技术创新者,美国 MTS 系统公司(MTS Systems Corporation)已开发出一系列先进的搅拌摩擦焊设备,能 够在线性和非线性轮廓上产生高速焊接。该公司研究开 发的智能化搅拌摩擦焊设备包括:1)I-STIR CNC 系列。 特点是将先进的控制和仪器与铣床平台相结合,可提供多 种工作范围。2)I-STIR BR 系统。特点是桥式龙门结 构,适合在宽 xy 平面上进行搅拌摩擦焊接。3)I-STIR VM系统。特点是 C 型框架结构,适合在长面板上进 行 x 轴搅拌摩擦焊接。

2002年,中国第一家专业化的搅拌摩擦焊技术授权 公司—中国搅拌摩擦焊中心即北京赛福斯特技术有限公 司成立,标志着搅拌摩擦焊技术在中国市场的研发及工程 应用工作的正式开启。公司成立以来,一直致力于搅拌摩 擦焊技术在中国的创新发展与推广应用。该公司研制的 搅拌摩擦焊设备具有先进、可靠、集成、数控、高效等特点, 可以提供纵缝、环缝、平面二维、空间三维、点焊、双轴肩及 机器人等搅拌摩擦焊设备。

航天工程装备(苏州)有限公司紧密围绕航空航天、 新能源汽车、船舶制造以及电力电子等领域需求,不断突 破智能型搅拌摩擦焊的关键软硬件技术,目前总体技术水 平已达国际先进水平。现有的优势技术有大载荷主轴、高 速电主轴技术,恒压力控制技术,焊缝轨迹控制技术,智能 搅拌摩擦焊装备的光机电系统集成技术。

## 5 应用

目前,FSW 技术已经被广泛应用于航空航天、船舶制 造、轨道交通、汽车及能源等工业领域。

美国国家航空航天局从 1995 年开始就投入了大量资源对 FSW 技术进行开发,并且在之前的 Space Shuttle Program 与目前 Space Launch System 等项目中广泛应用。波 音公司的 Delta IV 火箭、Space X 公司的 Falcon 9 火箭和 三菱重工的 H-IIB 火箭制造中都采用了 FSW 技术。洛克 希德·马丁公司针对 C-130 大型运输机,在飞机货舱地 板结构上采用 FSW 技术,实现了大型飞机壁板结构的整 体化制造,降低了制造成本,缩短了制造周期,减少了自身 质量。空客公司 A350-800/900 型飞机,在机身结构设计 论证方案中采用 FSW 制造后的总质量减少了 40%,制造 周期减少 20%。国内的 FSW 技术自 2003 年以来快速发 展,在技术基础和应用验证开展了十余年的持续研究,中 国航空工业集团公司北京航空制造工程研究所率先在新 一代战机和运输机上进行了开发和应用。

在欧洲一些国家,FSW 技术已在铝质汽车零部件制造 中得到广泛应用。德国宝马公司实现了 FSW 技术在汽车 车身、车轮、底盘和油箱等部件制造中的应用。瑞典萨帕公 司和日本轻金属公司实现了 FSW 技术在地铁车辆铝模块 化部件焊接中的应用。西门子公司和日立公司已广泛推行 FSW 技术开展铝合金车体制造。在汽车工业、高速客车与 船舶建造领域,FSW 技术为高强铝合金替代传统结构钢提 供了重要基础。福特、奥迪、通用、路虎、沃尔沃、马自达等 汽车公司以及世界各地的许多列车公司都率先应用了 FSW 技术;瑞典的 Sapa 公司、日本的川崎重工公司和新西 兰的 Tenix 公司等都广泛使用了 FSW 技术制造的铝合金结 构部件。船舶用铝合金部件是通过单面线性 FSW 连接长 的挤压型板材,从而制造成大面积的板材。使用 FSW 技术 能够为海军舰船制造大型零件,这些零件具有较小的尺寸 畸变,可以减少装配和组装中畸变技术的要求:在不降低质 量的情况下,降低了从制造到组装的总成本。

## 6 结语

FSW 焊接技术极大地推动了先进制造技术的发展。 面向未来,随着新材料、自动控制、智能制造等技术的发展 以及异种材料、复合材料和复杂结构的高焊接要求,精密智 能化焊接 FSW 工艺与装备将成为未来研究的主要趋势。

#### 参考文献:

- ZHOU N, ZHANG Z Y, JIN L, et al. Ductility improvement by twinning and twin-slip interaction in a Mg-Y alloy[J]. Materials & Design, 2014, 56: 966-974.
- BISWAS P, Kumar D A, MANDAL N R. Friction stir welding of aluminum alloy with varying tool geometry and process parameters
   J. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2012, 226(4): 641-648.
- [3] GIBSON B T, LAMMLEIN D H, PRATER T, et al. Friction stir welding: process, automation, and control[J]. Journal of Manu-

facturing Processes, 2014, 16(1): 56-73.

- [4] CAM G, MISTIKOGLU S. Recent developments in friction stir welding of Al-alloys [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, 23(6): 1936-1953.
- [5] KRISHNA P M, SIMHACHALA D, RAMANAIAH N. Effect of ageing on mechanical properties of dissimilar friction stir welded aluminum alloy (AA2024 and AA6351) joints [J]. Journal of Applied Sciences, 2012, 12(10): 1053-1057.
- [6] 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, 2017, 34(1): 1-38.
- [7] FONDA R W, KNIPLING K E. Texture development in friction stir welds[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2011, 16(4): 288-294.
- [8] MIRONOV S, INAGAKI K, SATO Y S, et al. Effect of welding temperature on microstructure of friction-stir welded aluminum alloy 1050 [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2015, 46(2): 783-790.
- [9] PADHY G K, WU C S, GAO S, et al. Local microstructure evolution in Al6061-T6 friction stir weld nugget enhanced by ultrasonic vibration[J]. Materials & Design, 2016, 92(92): 710-723.
- [10] PADHY G K, WU C, GAO S. Subgrain formation in ultrasonic enhanced friction stir welding of aluminium alloy[J]. Materials Letters, 2016, 183: 34-39.
- PADHY G K, WU C, GAO S. Precursor ultrasonic effect on grain structure development of AA6061 - T6 friction stir weld
   [J]. Materials & Design, 2017, 116: 207-218.
- [12] GAO S, WU C, 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.
- [13] PRANGNELL P B, HEASON C P. Grain structure formation during friction stir welding observed by the 'stop action technique' [J]. Acta Materialia, 2005, 53(11): 3179-3192.
- [14] CHEN Z W, PASANG T, Qi Y. Shear flow and formation of Nugget zone during friction stir welding of aluminium alloy 5083-O[J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 474 (1/2): 312-316.
- [15] SIMAR A, PARDOEN T, DE Meester B. Effect of rotational material flow on temperature distribution in friction stir welds
   [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2007, 12
   (4): 324-333.
- [16] WANG Z, WANG H Y, LIU L M. Study on low temperature brazing of magnesium alloy to aluminum alloy using Sn - xZn solders[J]. Materials & Design, 2012, 39: 14-19.
- [17] 王希靖,张忠科,韩道彬,等.搅拌摩擦焊中摩擦头前进阻力的检测及分析[J].焊接学报,2010,31(4):1-4.
- [18] CRAWFORD R, COOK G E, STRAUSS A M, et al. Experimental defect analysis and force prediction simulation of high weld pitch friction stir welding [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2006, 11(6): 657-665.
- [19] ARORA A, NANDAN R, REYNOLDS A P, et al. Torque, power requirement and stir zone geometry in friction stir welding through modeling and experiments [J]. Scripta Materialia, 2009, 60(1): 13-16.
- [20] 刘奋军,傅莉,张纹源,等. 2099-T83/2060-T8 异质 Al-Li

合金搅拌摩擦焊搭接界面结构与力学性能[J]. 金属学报, 2015, 51(3): 281-288.

- [21] 康举,李吉超,冯志操,等. 2219-T8 铝合金搅拌摩擦焊接 头力学和应力腐蚀性能薄弱区研究[J].金属学报,2016, 52(1):60-70.
- [22] 房湛, 王凡, 尹玉环, 等. 2195/2219 异种材料搅拌摩擦焊 接头的组织与性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46 (7): 273-277.
- [23] SINGH R K R, PRASAD R, PANDEY S, et al. Effect of cooling environment and welding speed on fatigue properties of friction stir welded Al-Mg-Cr alloy [J]. International Journal of Fatigue, 2019, 127: 551-563.
- [24] ZHANG L, ZHONG H L, LI S C, et al. Microstructure, mechanical properties and fatigue crack growth behavior of friction stir welded joint of 6061-T6 aluminum alloy[J]. International Journal of Fatigue, 2020, 135: 105556.
- [25] DAS J, BANIK S R, REDDY S R S K, et al. Review on process parameters effect on fatigue crack growth rate in friction stir welding [J]. Materials Today: Proceedings, 2019, 18: 3061-3070.
- [26] SALIH O S, NEATE N C, OU H, et al. Influence of process parameters on the microstructural evolution and mechanical characterisations of friction stir welded Al-Mg-Si alloy [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 275: 116366.
- [27] RANJAN R, OLIVEIRA M A C, GUO S H, et al. Fatigue analysis of friction stir welded butt joints under bending and tension load[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2019, 206: 34-45.
- [28] GAO F Y, GUO Y F, QIU S W, et al. Fracture toughness of friction stir welded TA5 titanium alloy joint [J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 776: 138962.
- [29] 徐韦锋, 刘金合, DAOLUN C. 厚板铝合金搅拌摩擦焊接头 沿板厚方向低周疲劳性能不均匀性研究[J]. 金属学报, 2015(5): 77-86.
- [30] 王晨, 王贝贝, 薛鹏, 等. SiCp/6092Al 复合材料搅拌摩擦 焊接头的疲劳行为研究[J]. 金属学报(中文版), 2019, 55(1): 149-159.
- [31] 刘奋军,傅莉,陈海燕. 铝合金薄板高转速搅拌摩擦焊接头 组织与力学性能[J]. 金属学报, 2017, 53(12): 1651-1658.
- [32] 董继红,董春林,孟强,等.高强铝合金薄板搅拌摩擦焊接
   头显微组织及力学性能[J].稀有金属材料与工程,2013
   (增刊2):423-427.
- [33] 杨超,王继杰,马宗义,等.7B04 铝合金薄板的搅拌摩擦焊 接及接头低温超塑性研究[J].金属学报,2015,51(12): 1449-1456.
- [34] IQBAL P, JAIN R, PAL S K. Numerical and experimental study on friction stir welding of aluminum alloy pipe[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 274: 116258.
- [35] SADOUN A M, WAGIH A, FATHY A, et al. Effect of tool pin side area ratio on temperature distribution in friction stir welding [J]. Results in Physics, 2019, 15: 102814.
- [36] MANEIAH D, MISHRA D, RAO K P, et al. Process parameters optimization of friction stir welding for optimum tensile strength in Al6061-T6 alloy butt welded joints [J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 27: 904-908.
- [37] AHMED K E, NAGESH B M, RAJU B S, et al. Studies on the effect of welding parameters for friction stir welded AA6082 re-

inforced with Aluminium Oxide[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 20: 108-119.

- [38] KADAGANCHI R, GANKIDI M R, GOKHALE H. Optimization of process parameters of aluminum alloy AA 2014-T6 friction stir welds by response surface methodology [J]. Defence Technology, 2015, 11(3): 209-219.
- [39] SHASHI K S, MURUGAN N, RAMACHANDRAN K K. Identifying the optimal FSW process parameters for maximizing the tensile strength of friction stir welded AISI 316L butt joints [J]. Measurement, 2019, 137: 257-271.
- [40] RAJENDRAN C, SRINIVASAN K, BALASUBRAMANIAN V, et al. Identifying combination of friction stir welding parameters to maximize strength of lap joints of AA2014 - T6 aluminium alloy[J]. Australian Journal of Mechanical Engineering, 2019, 17(2): 64-75.
- [41] COLEGROVE P A, SHERCLIFF H R. 3 Dimensional CFD modelling of flow round a threaded friction stir welding tool profile [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 169(2): 320-327.
- [42] RAJENDRAN C, SRINIVASAN K, BALASUBRAMANIAN V, et al. Effect of tool tilt angle on strength and microstructural characteristics of friction stir welded lap joints of AA2014-T6 aluminum alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(9): 1824-1835.
- [43] MAHTO R P, KUMAR R S, PAL S K. Characterizations of weld defects, intermetallic compounds and mechanical properties of friction stir lap welded dissimilar alloys [J]. Materials Characterization, 2020, 160: 110115.
- [44] SHAH L H, WALBRIDGE S, GERLICH A P. Tool eccentricity in frictionstir welding: a comprehensive review [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2019, 24(6): 566-578.
- [45] SHAH L H, GUO S, WALBRIDGE S, et al. Effect of tool eccentricity on the properties of friction stir welded AA6061 aluminum alloys[J]. Manufacturing Letters, 2018, 15: 14-17.
- [46] SHAH L H, MIDAWI A R H, WALBRIDGE S, et al. Influence of tool eccentricity on the material flow and microstructural properties of AA6061 aluminum alloy friction stir welds[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 826: 154219.
- [47] GHOSH M, KUMAR K, KAILAS S V, et al. Optimization of friction stir welding parameters for dissimilar aluminum alloys [J]. Materials & Design, 2010, 31(6): 3033-3037.
- [48] JAGATHESH K, JENARTHANAN M P, BABU P D, et al. Analysis of factors influencing tensile strength in dissimilar welds of AA2024 and AA6061 produced by friction stir welding (FSW) [J]. Australian Journal of Mechanical Engineering, 2017, 15(1); 19-26.
- [49] SHUNMUGASUNDARAM M, PRAVEEN K A, PONRAJ S L, et al. Optimization of process parameters of friction stir welded dissimilar AA6063 and AA5052 aluminum alloys by Taguchi technique[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 27: 871-876.
- [50] PRASAD M V R D, KUMAR N K. Process parameters optimization in friction stir welding by ANOVA[J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(2): 4824-4831.
- [51] 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.
- [52] HOU W, SHAH L H, HUANG G Q, et al. The role of tool off-

set on the microstructure and mechanical properties of Al/Cu friction stir welded joints[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 825: 154045.

- [53] GUO Y N, MA Y E, WANG F. Dynamic fracture properties of 2024–T3 and 7075–T6 aluminum friction stir welded joints with different welding parameters[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2019, 104: 102372.
- [54] MSOMI V, MBANA N, MABUWA S. Microstructural analysis of the friction stir welded 1050-H14 and 5083-H111 aluminium alloys[J]. Materials Today: Proceedings, 2019, 26: 189-192.
- [55] AONUMA M, TSUMURA T, NAKATA K. Weldability of pure titanium and AZ31 magnesium alloy by friction stir welding[J]. Keikinzoku, 2007, 57(3): 112-118.
- [56] AONUMA M, NAKATA K. Effect of alloying elements on interface microstructure of Mg-Al-Zn magnesium alloys and titaniumjoint by friction stir welding[J]. Materials Science and Engineering: B, 2009, 161(1/2/3): 46-49.
- [57] AONUMA M, NAKATA K. Dissimilar metal joining of ZK60 magnesium alloy and titanium by friction stir welding[J]. Materials Science and Engineering: B, 2012, 177(7): 543-548.
- [58] SIVAM S P S S, SARAVANAN K, PRADEEP N, et al. Grey relational analysis and anova to determine the optimum process parameters for friction stir welding of Ti and Mg alloys[J]. Periodica Polytechnica Mechanical Engineering, 2018, 62 (4): 277-283.
- [59] CHOI J, LIU H, USHIODA K, et al. Dissimilar friction stir welding of immiscible titanium and magnesium [J]. Materialia, 2019(7): 100389.
- [60] LI Q H, MA Z W, JI S D, et al. Effective joining of Mg/Ti dissimilar alloys by friction stir lap welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 278: 116483.
- [61] RAI R, DE A, BHADESHIA H H, et al. Review: friction stir welding tools[J]. Science and Technology of welding and Joining, 2011, 16(4): 325-342.
- [62] SCIALPI A, D Filippis L A C, CAVALIERE P. Influence of shoulder geometry on microstructure and mechanical properties of friction stir welded 6082 aluminium alloy [J]. Materials & Design, 2007, 28(4): 1124-1129.
- [63] PATEL V, BADHEKA V J, KUMAR A. Effect of polygonal pin profiles on friction stir processed superplasticity of AA7075 alloy [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 240: 68-76.
- [64] FELIX XAVIER MUTHU M, JAYABALAN V. Effect of pin profile and process parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir welded Al-Cu joints[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(4): 984-993.
- [65] SU H, WU C. Determination of the traverse force in friction stir welding with different tool pin profiles [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2019, 24(3): 209-217.
- [66] HOU W T, SHEN Y F, HUANG G Q, et al. Dissimilar friction stir welding of aluminum alloys adopting a novel dual-pin tool: microstructure evolution and mechanical properties [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 36: 613-620.
- [67] ZHAO P C, SHEN Y F, HUANG G Q, et al. Numerical simulation of friction stir butt-welding of 6061 aluminum alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2018, 28(6): 1216-1225.
- [68] GHATE N D, SOOD A, SRIVASTAVA A, et al. Ductile frac-

ture based joint formation mechanism during friction stir welding [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2020, 168: 105293.

- [69] 武传松,宿浩,石磊.搅拌摩擦焊接产热传热过程与材料流 动的数值模拟[J].金属学报(中文版),2018,54(2): 265-277.
- [70] 张昭, 别俊. 搅拌摩擦焊接过程数值仿真的完全热力耦合模型[J]. 中国机械工程, 2008, 19(10): 1240-1245.
- [71] TANG J M, SHEN Y F. Numerical simulation and experimental investigation of friction stir lap welding between aluminum alloys AA2024 and AA7075 [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 666: 493-500.
- [72] BUFFA G, HUA J, SHIVPURI R, et al. Design of the friction stir welding tool using the continuum based FEM model[J]. Materials Science and Engineering: A, 2006, 419(1/2): 381-388.
- [73] PADMANABAN R, KISHORE V R, BALUSAMY V. Numerical simulation of temperature distribution and material flow during friction stir welding of dissimilar aluminum alloys[J]. Procedia Engineering, 2014, 97: 854-863.
- [74] KHANDKAR M Z H, KHAN J A, REYNOLDS A P, et al. Predicting residual thermal stresses in friction stir welded metals
   [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 174(1): 195-203.
- [75] SELVAMANI S T, UMANATH K, PALANIKUMAR K. Heat transfer analysis during friction stir welding of Al6061-T6 Alloy
   [J]. Journal of Engineering Research and Applications (IJERA), 2011(4): 1453-1460.
- [76] RIAHI M , NAZARI H. Analysis of transient temperature and residual thermal stresses in friction stir welding of aluminumalloy 6061-T6 via numerical simulation [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 55(1/2/3/4): 143-152.
- [77] JAMSHIDI A H , SERAJZADEH S , KOKABI A H. Experimental and theoretical evaluations of thermal histories and residual stresses in dissimilar friction stir welding of AA5086 – AA6061[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 61(1/2/3/4): 149-160.
- [78] AHMAD B, GALLOWAY A, TOUMPIS A. Advanced numerical modelling of friction stir welded low alloy steel[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 34: 625-636.
- [79] SALLOOMI K N. Fully coupled thermomechanical simulation of friction stir welding of aluminum 6061-T6 alloy T-joint [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 45: 746-754.
- [80] BOUKRAA M, LEBAAL N, MATAOUI A, et al. Friction stir welding process improvement through coupling an optimization procedure and three-dimensional transient heat transfer numerical analysis[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 34: 566-578.
- [81] LONG L, CHEN G Q, ZHANG S, et al. Finite-element analysis of the tool tilt angle effect on the formation of friction stir welds [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 30: 562-569.
- [82] ZHANG S, SHI Q, LIU Q, et al. Effects of tool tilt angle on the in-process heat transfer and mass transfer during friction stir welding[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 125: 32-42.

收稿日期:2020-06-20