

# 搅拌摩擦焊接及其加工研究现状与展望\*

任淑荣, 马宗义, 陈礼清

(中国科学院金属研究所, 沈阳 110016)

**摘要** 搅拌摩擦焊是一种新型的固相焊接工艺, 在近些年取得了巨大的研究进展。从搅拌摩擦焊的工作原理和特点出发, 对搅拌摩擦焊工艺参数、焊缝组织及性能进行了评述; 最后简要介绍了搅拌摩擦加工的最新发展及在工业领域中的应用概况。

**关键词** 搅拌摩擦焊接 搅拌摩擦加工 材料改性 应用

## Research Status and Prospect of Friction Stir Welding and Friction Stir Processing

REN Shurong, MA Zongyi, CHEN Liqing

(Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016)

**Abstract** Friction stir welding (FSW) is a relatively new solid state joining process and great development has been achieved in recent years. In this article, the principle and characteristics of the FSW are presented. The effects of welding process parameters on weld, the friction stir welded joint microstructure and properties are also discussed. Finally, the recent development of friction stir processing and the applications of FSW are briefly introduced.

**Key words** friction stir welding, friction stir processing, material modification, application

### 0 引言

搅拌摩擦焊接(Friction stir welding, 简称FSW)是英国焊接研究所(The welding institute, 简称TWI)于1991年发明并获世界范围内专利保护的新一代固相焊接技术,也是世界焊接技术发展史上自发明到工业应用时间跨度最短且发展最快的一项神奇连接技术,被誉为“世界焊接史上的第二次革命”<sup>[1]</sup>。FSW的发明引起了世界范围的关注,截至2002年9月15日,得到TWI专利技术许可的用户有78家,与此相关的专利技术有551项,覆盖24个国家和地区。著名的Boeing、NASA、BAE、HONDA、GE、HITACHI、MARTIN、ESAB、ALCAN等公司购买了此项技术,并已在航空航天、车辆、造船等行业得到了大量成功应用<sup>[2-10]</sup>。

与传统焊接方法相比,FSW热源来自工件和搅拌头间的摩擦,焊接温度一般低于材料熔点,焊接过程中没有工件熔化,故产生气孔的几率很小,而且接头残余内应力和工件变形也很小,从而排除了焊接缺陷产生的可能性<sup>[11,12]</sup>。众所周知,利用传统TIG焊接铝合金时,由于表面高熔点致氧化膜以及污垢的存在,焊前需严格清除后才可以进行焊接,而且焊接时易产生气孔等缺陷。而FSW技术的出现和发展为铝合金的焊接问题开拓了新的思路(如可以实现用熔焊难以保证质量的裂纹敏感性强的7000、2000系列铝合金的高质量连接),不仅能完成对接、搭接、丁字接等接合方式,而且接头力学性能较高,能一次完成较长、较大截面、多方位的焊接,便于机械化和自动化操作,因此成本也较低<sup>[13]</sup>。

作为新兴的固态连接工艺,FSW技术在有色金属等材料的

连接中具有广阔的应用前景。本文评述了FSW的研究与发展,并对在FSW基本原理基础上发展起来的一种新型材料加工技术——搅拌摩擦加工进行了介绍。

### 1 FSW原理及工艺特点

FSW是一种连续、纯机械的新型固相连接技术,其焊接过程如图1所示<sup>[14]</sup>。其中,搅拌头主要由轴肩(Shoulder)和搅拌针(Pin)组成。

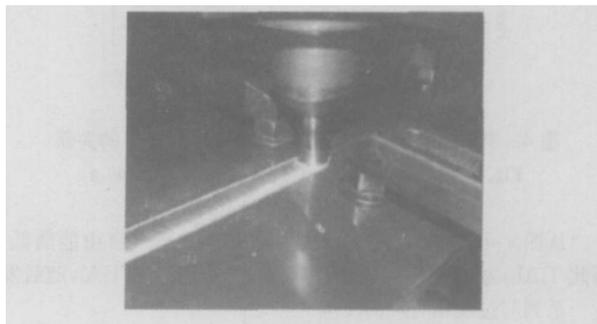


图1 搅拌摩擦焊实际焊接示意图

在焊接过程中,搅拌头高速旋转并将搅拌针挤入两块对接板材的接缝处,直至搅拌头的轴肩与工件紧密接触。搅拌针的作用是搅动接缝两侧的材料,使其产生塑性流变和混合;轴肩的作用是把由搅拌针搅动变形的材料传输到搅拌头后侧并同时施加锻造作用,从而形成密实无缺陷的焊缝。

从FSW基本原理可以看出,只要材料在高温下具有一定的塑性流变能力,就有可能对其焊接。其优点可以概括为:(1)

\*国家杰出青年科学基金;科学院百人计划资助项目

马宗义,联系人,研究员,博士. Tel: 024 83978908. E-mail: zy.ma@imr.ac.cn

固态连接;无粗大凝固组织和熔焊缺陷,热变形和残余应力小,可以实现大型框架结构的精密焊接;(2)制造成本低:焊前无需开坡口和特殊清理,无需金属填料、保护气体或焊剂,能量消耗比熔化焊低80%,还可实现水下焊接;(3)绿色环保:没有烟尘、飞溅、强弧光、辐照和辐射,噪音低;(4)机械化/自动化:类似于铣床加工,无需传统焊工的技术等级培训,操作过程简便,人为因素影响小,易于实现自动化,焊头质量重复性好;(5)工艺裕度大:允许对接间隙容差 $0.1t$ ( $t$ 为板厚);(6)焊缝表面好:焊后工件表面平整,无明显焊缝凸起和焊滴,无需后续表面处理;(7)力学性能好:疲劳、断裂及弯曲等性能明显优于熔化焊,且接头力学性能各向同性。

与其它焊接技术相比,FSW 还存在着以下不足:(1)焊接过程中需要搅拌头向被焊工件施加足够的顶锻压力和向前驱动力,要求焊接设备有足够的稳定性和刚性;(2)相对于熔焊,其焊速还不是很高;(3)被焊工件必须有刚性固定,焊接过程中不能移位;(4)需要在焊缝背面加垫板;(5)当焊接完毕搅拌头从工件中回抽时,在焊缝尾部会留下一个洞(称为“匙孔”),需要将该洞部切除或添加引焊板和出焊板。

随着研究的深入和发展,FSW 的缺点正在被逐渐改进。如近年来开发的回抽技术,在焊接临近结束时通过逐渐把搅拌针回抽至与轴肩平齐来消除匙孔;还有最近发展的双轴肩技术,不再需要背面的支撑垫板,使焊接操作更加灵活、方便。

## 2 FSW 工艺参数

材料在 FSW 过程中经历了复杂的流变及混合,致使搅拌头形状、焊接参数(焊接速度  $v$  和搅拌头转速  $\omega$ )及接头形式对材料流变方式和温度场产生很大作用,从而影响材料组织变化。

### 2.1 搅拌头

搅拌头是 FSW 技术的关键,其好坏不仅决定能否扩大待焊材料种类及能否提高待焊材料的板厚范围,而且直接影响焊缝质量和焊接速度。因此,搅拌头可称为 FSW 技术的核心,是 FSW 工艺中最重要的技术之一。最常见的搅拌头是搅拌针为柱形和锥形的 2 种(图 2)<sup>[15, 16]</sup>。

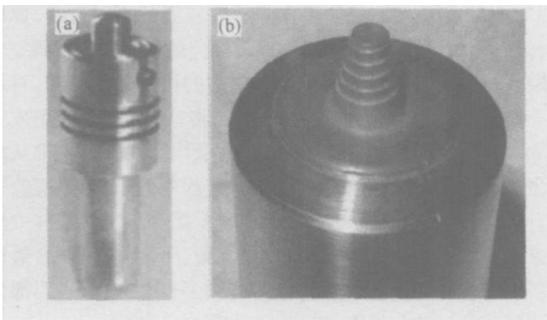


图 2 搅拌针为柱形(a)以及锥形(b)的搅拌头

图 2(a)所示搅拌头使用了最早的柱形搅拌针<sup>[15]</sup>,是 TWI 早期的研究成果,属于 5651 系列,主要是为焊接 1.2~12mm 的铝合金板而研制的。然而,由于焊接过程中柱形搅拌针周围的软化材料流动性能较差,导致焊后接头的性能较低。若铝合金焊接板厚大于 12mm,则必须设计全新的搅拌头。图 2(b)是改进后的搅拌针为锥形的搅拌头,试验表明,焊后接头性能有很大提高。<sup>[16]</sup>

近年来, TWI 研制了两种新型搅拌头——Whorl<sup>TM</sup> 和 MX Triflute<sup>TM</sup>, 见图 3<sup>[17, 18]</sup>。这两种搅拌头较 5651 系列有很大的改进, Whorl<sup>TM</sup> 系列主要焊接厚的 6082 T6 铝合金板料,单面焊时,焊接板厚可以为 25~40 mm;双面焊时,板厚可达 75mm。其截锥体外形的搅拌针带有螺旋状纹路,不仅增强了焊缝金属的搅拌作用,也可向塑化的金属施加一个向下的运动,从而使得塑性金属更易流动。MX Triflute<sup>TM</sup> 系列搅拌头的表面有奇数个带有陡峭角度的凹槽,凹槽表面环绕着粗糙的螺旋线,这种设计进一步减小了搅拌针的体积,有助于焊缝金属的流动以及破碎和分散结合面的氧化物。当进行单面焊时,它可以焊接板厚为 6~50mm 的铝合金。此外,这两种系列的搅拌头上螺旋状凹槽和旋脊上的螺线能增大搅拌头的表面积,使搅拌头和材料的接触面积变大,有利于增加搅拌头与工件之间的摩擦,从而能够产生更多的热量。

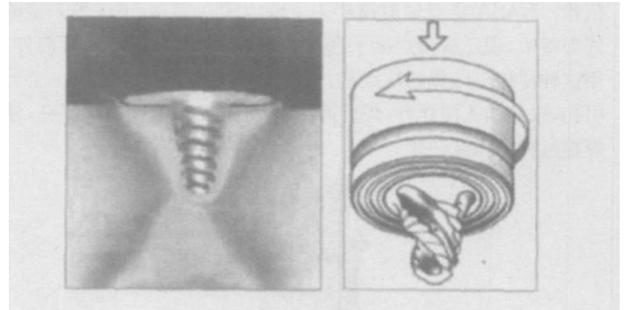


图 3 Whorl<sup>TM</sup>和 MX Triflute<sup>TM</sup> 搅拌针

非对称搅拌针中心轴与设备中心存在一个偏角,而轴肩表面垂直于设备中心轴,因而焊接时焊针不是以搅拌头自身中心轴旋转,如图 4 所示<sup>[15]</sup>。采用非对称搅拌针焊接时可以提高搅拌针周围塑性软化区的范围,同时这种搅拌针的搅动可以提高搅拌针的动态和静态体积比。而传统搅拌针的中心轴与设备中心轴重合,其旋转中心即为搅拌针的中心轴,因而只能靠改变搅拌针的形状来改善搅拌针的动态和静态体积比<sup>[15]</sup>。

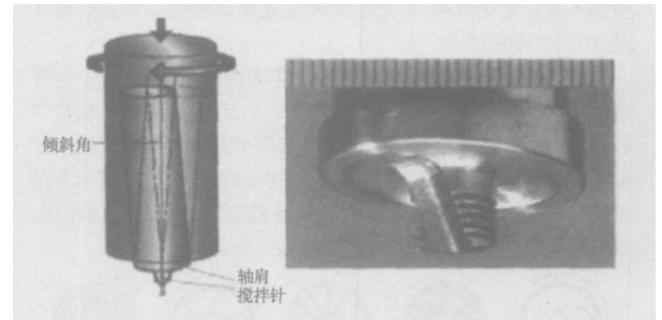


图 4 非对称搅拌针

FSW 的两个主要缺点是封闭焊缝尾部存在匙孔及焊接变厚度材料需更换不同长度搅拌针。为克服上述缺点, NASA 所属的马歇尔空间飞行中心设计了一种基于计算机控制的可伸缩式的搅拌头,如图 5 所示<sup>[19]</sup>。这种搅拌头在焊接收尾时由计算机控制自动退出工件,从而消除了匙孔问题。这种设计允许搅拌头的角度和长度依据待焊工件的厚度进行调整并在焊接收尾时完成闭合的焊缝。可伸缩式搅拌头的出现使 FSW 技术在汽车、造船及其它工业中的应用更具高效、通用和成本竞争的优势。

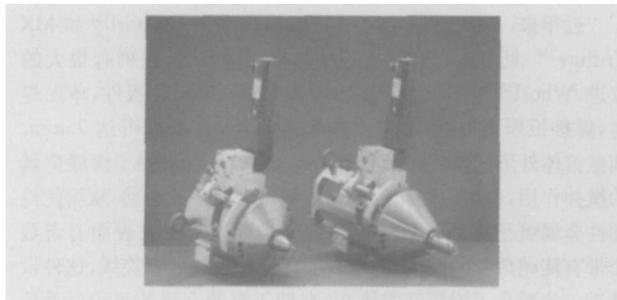


图5 可伸缩式搅拌头

随着FSW技术的发展,针对焊接材料和结构的特点,TWI、BOEING、MTS等公司已经开发出双轴肩搅拌头,如图6所示<sup>[20]</sup>。其主要功能是利用搅拌头的双轴肩使FSW过程中产生的作用力相互抵消,从而解除薄壁筒形件对接时对刚性装备的依赖。NASA将双轴肩搅拌头主要应用在坦克、飞机等大型圆周焊接中,现已成功焊接了直径为8.382m的环缝薄壁圆筒件。用这种搅拌头施焊的缺点是:焊接前需要在启焊处预制一个导引孔,以便插入搅拌针,焊后需将一侧轴肩拆卸,抽出搅拌针,使焊接过程操作复杂化。

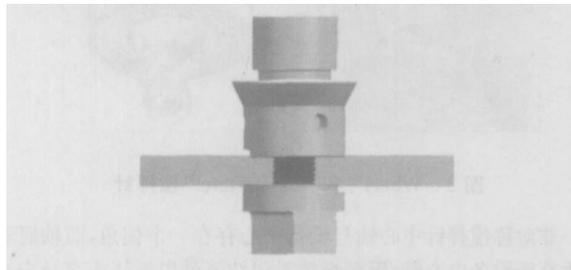


图6 双轴肩搅拌头

轴肩有两个主要作用:一是通过与工件表面摩擦来提供焊接热源;二是提供一个封闭的焊接环境,以防止高塑性软化材料从焊接区域溢出。其直径要适中,若尺寸过大,热输入量增加,导致热影响区尺寸增大,同时工件易产生变形;若尺寸过小,摩擦热不足以塑化材料,需要增大转速或降低焊速以保证热输入量,因而效率较低。

焊接不同材料或不同工况条件下焊接时,需选用不同外形的轴肩。常见的几种轴肩形貌如图7所示,它们都是在搅拌针和轴肩的交界处中间凹入。这些规则的几何图案不仅增大了轴肩与焊件表面的接触面积,提高了焊接时的闭合性,更重要的是能够让轴肩端部下方软化的材料受到向内方向的作用力,从而使轴肩和塑化材料紧密地耦合在一起。



图7 几种不同几何形貌的轴肩

## 2.2 焊接参数

与传统熔化焊方法相比,FSW的优点在于只需控制较少的工艺参数,即搅拌头旋转速度 $\omega$ 、焊接速度 $v$ 和压力 $P$ 。根据传热分析,通过旋转焊头与被焊材料的摩擦所产生的热源强度 $q$ 为<sup>[13]</sup>:

$$q = \frac{4}{3} \pi^2 \mu P \omega R^3 \quad (1)$$

其中: $\omega$ 为转速, $P$ 为轴肩与工件间压力, $\mu$ 为摩擦系数, $R$ 为轴肩直径。从式(1)中可以看出,搅拌头的转速是影响FSW热源的主要因素之一;当转速较低时,产生的摩擦热不足以使材料塑化,不能实现固相连接并在焊缝中形成孔洞;随着转速的提高,摩擦热逐渐增大,热塑性流动层由上而下逐渐增大,孔洞逐渐减小直至消失,形成致密的焊缝。但转速过高将导致焊针周围以及轴肩下面的材料温度达到或超过熔点,也无法形成固相连接<sup>[21]</sup>。根据所焊材料、板厚及焊接速度的不同,转速通常在200~2000 r/min之间。

焊接速度是搅拌摩擦焊中搅拌头在焊件中向前移动的速度,不同焊接条件所选的焊速也不同。若焊速过低,搅拌头所产生的热量使焊接温度过高,焊核区金属的温度达到或超过熔点,易产生液化裂纹,同时焊缝表面凹凸不平;若焊速过高,所产生的热量不足以使搅拌头周围的金属达到塑化状态,焊缝内部就容易形成孔洞。因此,应根据待焊材料、板厚及转速选择合适的焊接速度。

FSW过程中单位长度的热输入量和材料的塑性流变状态是决定焊缝质量的关键因素。焊缝线能量大小取决于搅拌头轴肩的直径、压力、摩擦系数以及搅拌头转速与焊速比( $\omega/v$ )。当焊接线能量适当,即 $\omega/v$ 在一定范围内时,才能获得质量良好的焊接接头。 $\omega/v$ 小,焊缝成型不好,甚至会在焊缝表面出现沟槽、内部出现孔洞等缺陷,不能形成良好的焊缝; $\omega/v$ 大,搅拌头所产生的热量使金属因过热而出现疏松,产生液化裂纹,从而导致焊缝成型和接头性能均较差<sup>[21]</sup>。

搅拌头与被焊工件表面直径的接触状态对焊缝成型有较大影响。当所施加压力不足时,焊缝底部在冷却后会由于金属的“上浮”而形成孔洞;当压力过大时,焊缝表面又会出现飞边、毛刺等缺陷。

## 3 FSW焊缝材料的流变行为

由于FSW过程自身的特点,至今仍没有办法直接观察到材料的流变过程,目前主要借助示踪材料加以研究。Seidel等<sup>[22]</sup>采用标记插入技术研究了AA2195材料的流动,将AA5454 H32制成的标记放置在焊缝对接面的不同位置,焊后将工件减薄、腐蚀,再通过金相法确定标记的最终位置。研究表明,垫板、轴肩以及焊缝区域外的金属共同构成“挤压模”,材料在这个“模”内运动,经过数字化处理后,将这些标记位置组成三维图来表示材料的流变行为,可以看出搅拌针两侧材料都从前向后发生了挤压。Colligan<sup>[23]</sup>在FSW过程中做了“急停实验”,即实验时突然停止焊接,再将带螺纹的搅拌针迅速从工件中反转出来,搅拌针周围的材料可以原样保留,不改变其形貌,最后将这部分材料进行抛光、腐蚀处理,得到了一些数据,表明部分材料绕搅拌针运动并最终在其后部沉淀。

对于FSW过程中材料塑性流变的计算机模拟目前研究得还比较少。Seidel等<sup>[22]</sup>建立了搅拌摩擦焊接过程的二维全耦合模型。此模型基于流体力学理论,把焊接过程中移动的固体认为是层流、粘性、非牛顿流体绕过旋转的圆柱体探针(搅拌头被简化为一个探针),材料软化所需要的热量由材料变形产生。结果表明,在探针直径范围内的材料仅后退侧绕过探针,而不是在探针两侧绕过,材料在变形区域速度被加速,与流经探针直径外面的材料相比,它有一种被压向下方的速度流动。

FSW 中材料的流动是一个非常复杂问题,受多种因素影响,如搅拌头形状、焊接参数、材料类型、工件温度等,因此,FSW 过程材料流动行为及模拟研究还尚处于探索阶段。虽然材料的流动行为在国外已成为热点问题,但在国内研究得还比较少,所取得的结果也仅限于对试验现象的观察和分析,缺乏数值模拟及深层次的理论研究,所提出的模型也过于简单。为深入了解 FSW 焊缝的形成机制,应将材料流动行为研究的重点放在更深层次的理论研究和分析上。

## 4 FSW 焊缝组织及性能

### 4.1 焊缝组织

微观组织结构与接头力学性能密切相关。一般将 FSW 接头分为 3 个部分,即焊核区(Weld nugget 或 Dynamically recrystallized zone, 简称 DXZ)、热机械影响区(Thermo mechanically affected zone, 简称 TMAZ)和热影响区(Heat affected zone, 简称 HAZ),如图 8 所示<sup>[24]</sup>。可以看出,焊核区位于焊缝中心,一般呈椭圆形的“洋葱”环状结构;焊核区外围是热机械影响区,这部分发生了明显的塑性变形;热机械影响区以外到母材之间的部分是热影响区。

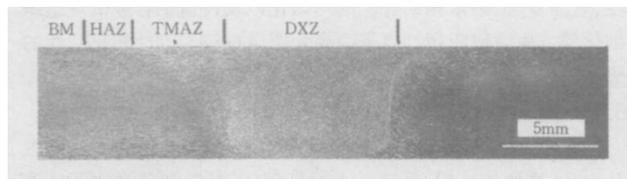


图 8 7050Al 搅拌摩擦焊接头横截面的宏观形貌

焊核区金属在搅拌头的强烈搅拌摩擦作用下发生显著的塑性变形和完全的动态再结晶,形成细小、等轴晶粒的微观组织<sup>[25]</sup>。一般认为,这些再结晶晶粒中位错密度较低,但是,最近一些研究表明,焊核区细小的再结晶组织中包含大量的亚晶界、亚晶及位错。

焊核区形状大体上有两种:盆状和椭圆形。大部分 FSW 焊核区形状为椭圆形,但 Sato 等<sup>[26]</sup>在搅拌摩擦焊接 6063Al T5 时发现了盆状焊核,这是因为工件表面受搅拌针的强烈搅拌和塑性流动,导致了盆状焊核的形成。Ma 等<sup>[27]</sup>的研究表明,在低焊接转速下,焊核为盆状(图 9(a)),随焊接转速的提高,焊核变成椭圆形,并出现明显的“洋葱”环特征(图 9(b))。

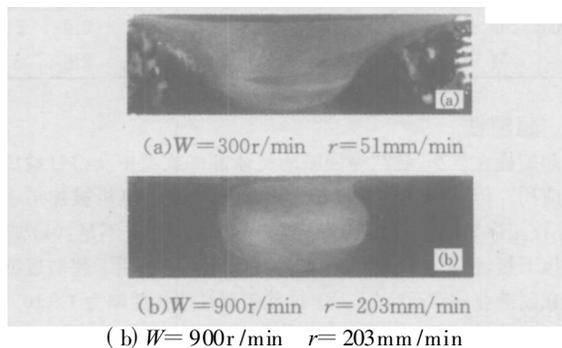


图 9 A356 焊核区的形状

焊核区“洋葱”圆环的形成主要与搅拌头的几何形状和焊接工艺参数有关,这是因为圆环的形成本质上取决于塑性流体的运动,且以上两者均影响塑性流体的运动。圆环的中心比较密,往外围比较稀疏。圆环间隙与焊接工具每一转前进的距离相等。此外,圆环的尺寸与搅拌针的尺寸密切相关,一般焊核区直

径比焊针直径稍大,而且随着焊针直径的增大而增大。

热机械影响区位于焊核区的外围两侧,在搅拌头的热、机械作用下发生了不同程度的塑性变形,形成了由弯曲而拉长晶粒组成的微观组织,如图 10 所示<sup>[28]</sup>。一些研究发现,这一区域存在一些沉淀相,而且随着热量的增加,沉淀相的数量不断增加。此外,在热机械影响区中还发现存在亚晶界。

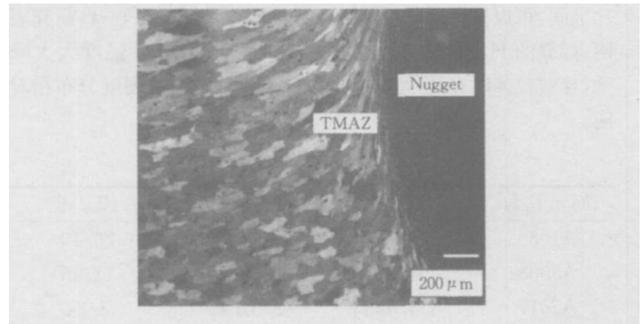


图 10 搅拌摩擦焊 2024Al 热机械影响区的显微组织

焊缝的热影响区没有受到搅拌头的机械搅拌作用,因而并没有发生塑性变形,仅在摩擦热循环作用下发生了一些微观结构的变化。对于时效强化和加工硬化铝合金,热暴露导致热影响区过时效(沉淀强化相的粗化和部分溶解)和位错密度下降,从而导致焊后接头的硬度明显下降。

### 4.2 焊缝性能

FSW 接头(焊缝)的性能一直是研究热点,这里仅对其焊后硬度、强韧性及疲劳等性能进行归纳。

对 FSW 接头横截面微观硬度测试表明,微观硬度在接头各个微观组织区域分布是不均匀的,如图 11 所示<sup>[29]</sup>。其中,HAZ 在搅拌摩擦热循环的作用下发生沉淀强化相粗化和溶解,形成软化区,导致硬度显著降低,从而成为接头最薄弱的环节。因此,如何控制 FSW 过程中的热输入量以减小对接头的软化作用,是获得高强度 FSW 接头的关键。在保证焊缝成形和没有缺陷的前提下,应尽量减少对材料的热输入,亦即尽量增大  $v/\omega$  (mm/r) 的值<sup>[25]</sup>。对于铝合金,沉淀强化和固溶强化铝合金在搅拌摩擦焊后硬度变化也有所不同。

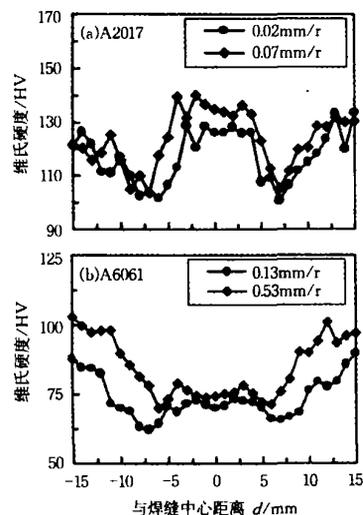


图 11 搅拌摩擦焊接头的微观硬度分布

焊后接头(铝合金)室温拉伸试验结果表明,接头的拉伸强度可以达到母材的70%以上,延伸率达到母材的60%以上,如表1所示<sup>29</sup>。FSW接头的性能,除了与母材本身的性能有关外,还取决于搅拌头的形状、尺寸(轴肩和搅拌头直径)以及主轴倾角、焊接压入量、焊接参数(搅拌头转速 $\omega$ 和焊接速度 $v$ )等。通过对这些因素影响规律的研究及优化,寻求最佳焊接参数配比区间,可以获得最佳性能的搅拌摩擦焊缝。此外,一些研究表明,焊缝的HAZ由于沉淀强化相粗化和溶解,使强度大大降低,导致拉伸时在此处最早断裂,这与图11(b)的硬度分布相对应。

表1 搅拌摩擦焊/母材的力学性能

Materials	UTS /MPa	YS /MPa	EL /%
A 1050	84/106	51/68	20/19
A 5083	264/361	146/237	11/16
A 2017	354/428	273/319	3/24
A 2024	137/185	—	—
A 7075	420/565	301/515	—
A 6061	238/309	164/278	5/13

在FSW时,HAZ的硬度和强度最低,对热循环的控制是获得高强度的关键。为了获得最佳的机械性能,焊后热处理是热处理强化材料提高焊缝性能的最好选择。但是,在许多工况条件下,无法进行后续热处理。

焊缝的疲劳性能是一个重要的考核指标,近年来,对其应力循环疲劳(S-N)和疲劳裂纹扩张行为的研究越来越多,并且更加深入。如采用10mm厚的5083 O铝合金焊件,使用应力比 $R=0.1$ 进行疲劳试验时,5083 O铝合金FSW对接接头的疲劳寿命是金属极电弧焊的9~12倍,且计算疲劳特征值为67.3MPa,远高于金属极电弧焊(MIG)的值(39.8MPa),如图12所示<sup>30</sup>。同时,要获得优异的疲劳性能,对接焊缝的根部必须全部焊上。与其他焊接工艺一样,进行搅拌摩擦焊时同样需要避免根部缺陷。

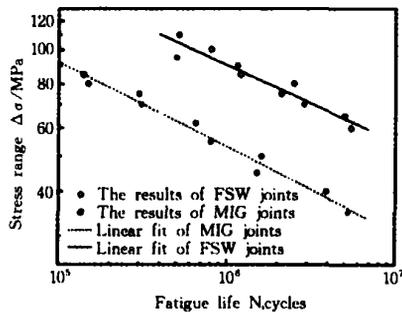


图12 FSW与MIG焊接接头S-N曲线( $R=0.1$ )

### 5 FSW可焊接的材料

FSW焊接温度低于材料熔点,焊接过程中始终没有材料的熔化,故理论上讲,只要材料在高温下具有一定的塑性流变能力,就有可能采用FSW技术进行焊接。此外,搅拌头的性能要满足要求,即在焊接过程中有足够的热强度,FSW就可以用来焊接多种材料和合金。目前,除了焊接铝合金外,国内外已用FSW成功焊接了钛合金、钢、铝基复合材料、镁合金以及铜合

金,而且焊后材料的机械性能达到了母材的80%~90%,有的甚至超过了母材的性能,具体见表2<sup>31-35</sup>。

表2 搅拌摩擦焊可焊接材料(FSW/母材)及其力学性能

Materials	UTS /MPa	YS /MPa	EL /%
Ti 6Al 4V	912/897	1013/957	12/12
304L	621/483	340/172	—
6061Al B <sub>4</sub> C	209/248	136/124	4/12
AZ31	235/259	—	—
Copper	225/252	—	—

## 6 搅拌摩擦加工的新发展

除了作为一种焊接方法外,FSW还可用于材料微观组织的改性和制造,这种方法称为搅拌摩擦加工(Friction stir processing,简称FSP)。其基本思想是,利用搅拌头所造成加工区材料的剧烈塑性变形、混合、破碎和热暴露,实现微观结构的致密化、均匀化和细化。1999年,美国密苏里大学的Mishra博士首次采用该技术制备了细晶超塑性铝合金<sup>36</sup>。目前,FSP已在超塑性、表面复合、纳米相铝合金的均匀化以及铸造铝合金微观组织细化等方面取得应用。以下简要介绍微观结构改性和超塑性的研究工作。

### 6.1 微观结构改性

普通Al-Si-Mg合金铸件由于粗大的针状Si相和铝枝晶以及缩孔、疏松等缺陷,导致其力学性能,尤其是塑性和疲劳性能较低。传统上采用各种化学改性和热处理方法对其进行改性处理,然而这些方法不仅工序繁杂,而且不能完全消除铸造空洞,也很难使微观组织完全均匀化。Ma等<sup>37,38</sup>的研究表明,在采用FSW对A356铸件进行加工后,粗大针状Si相被破碎成近似等轴粒子并均匀分布在铝基体中,铸造空洞被弥合,铝枝晶被破碎,基体晶粒被细化,使材料的力学性能得到明显改善,特别是塑性(表3)和疲劳性能。

表3 A356与搅拌摩擦加工后的室温拉伸试验

Status	As cast or as FSP			Aged (155 °C/4h)			T6 (540 °C/4h + 155 °C/4h)		
	UTS /MPa	YS /MPa	EL /%	UTS /MPa	YS /MPa	EL /%	UTS /MPa	YS /MPa	EL /%
As cast	169	132	3	153	138	2	220	210	2
FSP	251	171	31	281	209	26	301	216	28

### 6.2 超塑性

超塑性在汽车、航空等领域的整体部件成型中获得日益广泛的应用。传统细晶超塑性铝合金的制备采用热机械加工手段,不仅工序繁杂、制备成本高,而且还有3个明显不足:(1)需要大压下量,使超塑性铝板通常小于3mm厚,限制了超塑性成型工艺在制造业的广泛应用;(2)最佳超塑性应变速率为 $1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3} s^{-1}$ ,对于大规模工业化生产,生产效率太低;(3)超塑性通常只能高温下实现,既浪费能源,又导致成型后工件性能降低。因而,近年来大量的研究致力于发展新的细晶铝合金制备技术,如等通道角挤压、高压扭转、多向锻造、叠轧复合等。

FSP是一种全新的超塑性细晶铝合金制备技术。Mishra等<sup>36</sup>首先报道了搅拌摩擦加工7075Al的超塑性,在490 °C、 $1 \times$

$10^{-2} \text{ s}^{-1}$  的高应变速率下, 可获得超过 1000% 的超塑性延伸率。随后, Ma 等<sup>[39]</sup> 采用 FSP 对 Al 4Mg 1Zr 合金进行处理, 得到  $1.5 \mu\text{m}$  的微细晶粒; 在  $525 \text{ }^\circ\text{C}$  及  $1 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$  高应变速率下, 获得 1280% 的超塑性延伸率; 即使在  $550 \text{ }^\circ\text{C}$  的高温下, 仍获得 1210% 的延伸率, 这表明高温下也能保持较好的超塑性。此外, Charit 等<sup>[40]</sup> 采用 FSP 技术对 2024 铝合金进行处理, 得到高应变速率的超塑性特征, 当应变速率为  $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 、温度为  $430 \text{ }^\circ\text{C}$  时, 材料的最高塑性达到 525%。上述研究表明, FSP 是一种非常有效的制备高应变速率超塑性细晶铝合金的手段。目前对这方面的研究还不是很多, 有许多问题有待深入研究或澄清。

## 7 FSW 技术的应用

自 FSW 发明以来, 由于其焊缝组织好、接头力学性能优异, 已经在航空航天、造船、汽车、铁道车辆等制造领域显示出强劲的创新活力和广阔的应用前景, 并得到广泛应用。

### 7.1 航空航天

自 1995 年以来, 美国、日本和欧洲的一些国家开展了对 FSW 在航天中的应用性研究。美国航空航天工业部门成功焊接了以往难以焊接的 7075 铝合金低温燃料贮箱; 波音公司的空间防御实验室在 1998 年也将此技术用于火箭某些部件的焊接; 1999 年初, 波音公司在加州 Huntington Beach 工厂用 FSW 焊接生产了 Delta II 和 III 运载火箭的贮箱, 并于 2001 年又用 FSW 焊接生产了 Delta IV 运载火箭的贮箱。Delta IV 运载火箭的贮箱直径为 5 m, 是 Delta II 和 III 的 2 倍多, 采用 2219 T87 铝合金, 在阿拉巴马州的 Decatur 工厂生产。波马公司已经评定了 FSW 工艺在各种铝合金及铝锂合金上的应用, 并购置了 3 台 GTC 公司生产的 FSW 设备用于航天飞机外贮箱的焊接生产。

在航空领域中, 飞机制造零部件的装配连接使用了大量铆接和螺栓连接结构, 如在空中客车 A340 飞机上使用了超过 100 万个铆钉, 如果用 FSW 代替铆接, 一方面 FSW 具有比铆接更快的制造速度, 另一方面 FSW 在减少制造过程库存零部件的同时, 还大大减轻了飞机的结构质量。欧洲航空公司在几年前就开展了两项有关 FSW 的研究工作, 项目之一是“飞机框架结构的搅拌摩擦焊(WAFS)”, 历时 3 年, 由欧洲 13 个主要的飞机制造公司和研究机构合作承担; “宇航工业近期商业目标技术应用(TANGO)”是其第二个 FSW 研究项目, 由空客公司负责, 历时 4 年, 由 12 个国家 34 个合作伙伴参加, 主要研究飞机结构的 FSW 问题, 这些结构包括: 金属材料机身、复合材料机身、中心和侧部翼箱。美国 Eclipse 飞机制造公司斥资 3 亿美元用于 FSW 的飞机制造计划, 根据计划, 世界上 FSW 焊接的首架商业喷气飞机已于 2002 年 6 月完成首飞, 于 2003 年 8 月交付使用。Eclipse 500 商用客机机身基本全部利用 FSW 制造, 其中包括飞机蒙皮、翼肋、飞机地板以及结构件的装配等。

总之, FSW 技术的出现为航空航天工业设计和制造提供了一种新的方法和途径, 并逐步投入到实际生产中。

### 7.2 造船

船舶制造和海洋工业是 FSW 首先得到商业应用的两个工业领域, 主要应用在甲板、侧板、防水壁板、船体外壳、主体结构件、直升机降落平台、水上观测站、海洋运输结构件、帆船桅杆及结构件、船用冷冻器中空平板等。铝合金材料传统连接方法为铆接和弧焊连接, 铆接增加了制造时间、人力和物料使用量, 且

铝合金熔焊时易产生变形、缺陷和烟尘等, 也限制了弧焊的使用。所以 FSW 技术的发展, 以高集成度的预成型模块化制造来代替传统的船舶加强件结构的制造, 是船舶制造技术发展的必然和革命性的进步。

挪威 Haugesund 的 Gydro Marine Aluminium 铝板厂每年都要生产 70km 以上无缺陷的 FSW 铝板, 主要用于造船业的船甲板、壳体、船舱壁等部位的焊接。日本住友轻金属公司采用 FSW 生产铝质蜂窝结构板件和耐海水的板材, 其中耐海水的板材由 5 块宽度为 250mm 的 5083 铝合金挤压板连接成一块尺寸为  $1250\text{mm} \times 5000\text{mm}$  的铝合金板, 由于其焊缝根部和背面具有良好的平整性而被用作船舱壁板。FSW 在船舶轻合金预成形结构件上的应用, 在外观、重量、性能、成本以及制造时间上具有明显的优越性, 不仅能用于船舶轻合金结构件的制造, 还可用于现场装配, 为现代船舶制造提供了新的连接方法, 也是现代焊接技术发展的又一次飞跃。

### 7.3 陆路交通

对于陆路交通工业, FSW 在列车制造领域的应用主要为: 高速列车、轨道列车、地铁车厢和有轨电车、集装箱等; 在汽车上主要应用于引擎、底盘、车身支架、汽车轮毂、液压成型管附件、车门预成型件、车体空间框架、卡车车体、载货车的尾部升降平台、汽车起重器以及装甲车的防护甲板等<sup>[41]</sup>。

法国 Alstom 公司和丹麦 DanStir 公司目前正在进行车辆部件的 FSW 工业化研究。日立公司在进行单层和双层挤压件连接时都采用了 FSW 技术, 用于市郊特快列车车辆的制造。日本住友轻金属公司已将 FSW 工艺用于地铁车辆, 焊接工件长度已超过 3km, 且接合质量良好。日本住友轻金属公司生产的 FSW 焊接板已用于日本新干线车辆的制造, 时速达  $285 \text{ km/h}$ , 质量完全合格。

### 7.4 其他领域

在其他方面, FSW 也有较多的应用, 如民用建筑业中的铝合金桥梁、装饰板、门窗框架、管线、铝合金反应器、热交换器等; 电子工业中的发动机壳体、电器连接件、电器封装等。此外, FSW 还应用在冰箱冷却板、厨房电器、“白色”家用物品和工具、天然气和液化气储箱、家用装饰等。

总之, FSW 技术的开发和应用才刚刚开始, 今后将会具有巨大的潜在应用前景。

## 8 展望

作为革命性的绿色焊接技术, FSW 的出现对连接技术的发展产生了巨大的冲击和推动。目前已在航空航天、交通运输等领域得到广泛应用, 其应用速度已远远超过了对焊接过程中一些基本科学问题的理解。可焊接材料也由铝、镁、铜、钛等有色金属发展到复合材料和黑色金属, 在异种材料焊接中也显示了良好的开端。随着焊接设备和搅拌头的发展, 可应用 FSW 的可焊材料会更加广泛, 同时可提高焊接速度、优化接头性能、降低成本、实现自动化生产。

搅拌摩擦加工在细晶超塑性铝合金制备和铝基合金微观结构改性方面的研究表明, 它是一种非常有效的加工技术, 最近在复合材料制备、材料合成等方面也显示出了良好的应用前景。相信随着研究的深入, 搅拌摩擦加工将发展成为一种成熟的、多用途的材料加工技术, 并在工业领域得到实际应用。

## 参考文献

- 1 Knipstromk E, Pekkari B. Friction stir welding process goes commercial[J]. *Welding J*, 1997, (9): 55
- 2 王德庆, 刘日明, 丁成钢, 等. 搅拌摩擦焊接技术的发展现状[J]. *大连铁道学院学报*, 2002, 23(1): 75
- 3 张华, 林三宝, 吴林. 搅拌摩擦焊研究进展及前景展望[J]. *焊接学报*, 2003, 24(3): 91
- 4 张田仓, 郭德伦, 栾国红, 等. 固相连接新技术——搅拌摩擦焊技术[J]. *航空工艺技术*, 1999, (2): 35
- 5 柯黎明, 邢丽, 刘鸽平. 搅拌摩擦焊工艺及其应用[J]. *工艺与新技术*, 2000, 29(2): 7
- 6 栾国红, 柴鹏, 孙成彬, 等. 汽车制造驶上搅拌摩擦焊接之路[J]. *电焊机*, 2004, 34(1): 1
- 7 张彦华, 刘雪梅. 从搅拌摩擦焊及相关技术的发展看技术创新[J]. *电焊机*, 2004, 34(1): 12
- 8 Campbell G, Stotler T. Friction stir welding of armor grade aluminum plate[J]. *Welding J*, 1999, 78(12): 45
- 9 王元良, 周有龙, 胡久富. 解决运载工具铝合金焊接难题的新途径——搅拌摩擦焊[J]. *电焊机*, 2004, 34(1): 34
- 10 丁荣辉, 黎文献, 路彦军. 搅拌摩擦焊接技术最新进展[J]. *轻合金加工技术*, 2005, 33(2): 16
- 11 Webster P J, Djapic L, Browne P A, et al. Synchrotron X ray residual strain scanning of a friction stir weld [J]. *J Strain Analysis*, 2001, 36(1): 61
- 12 Djapic L, Webster P J. Residual stress field in a friction stir welded aluminum extrusion [J]. *Mater Sci Forum*, 2000, 347-349: 678
- 13 Frigaard  $\Phi$ , Grong  $\Phi$ , Midling O T. A process model for friction stir welding of age hardening aluminum alloys [J]. *Metall Mater Trans*, 2001, 32(A): 1189
- 14 Dawes C J. An introduction of friction stir welding and its development [J]. *Welding and Metal Fabrication*, 1995, 63(1): 13
- 15 王大勇, 冯吉才, 王攀峰. 搅拌摩擦焊用搅拌头研究现状与发展趋势[J]. *焊接*, 2004, (6): 6
- 16 Arbegast W J. Friction stir welding after a decade of development [J]. *Welding*, 2006, 85(3): 28
- 17 Thomas W M, Nicholas E D, Needham J C, et al. Friction stir welding [P]. UK Pat. GB 2306 266. 1995
- 18 Thomas W M, Andrews R E. High performance tools for friction stir welding (FSW) [P]. WO 99/52669
- 19 姚君山, 张彦华, 王国庆, 等. 搅拌摩擦焊技术研究进展[J]. *宇航材料工艺*, 2003, 4: 24
- 20 Ding J, Carter R, Lawless K. Friction stir welding files high at NASA [J]. *Welding J*, 2006, 3: 55
- 21 傅志红, 黄明辉, 周鹏展, 等. 搅拌摩擦焊及研究现状[J]. *焊接*, 2002, 11: 6
- 22 Seidel T U, Reynolds A P. Visualization of the material flow in AA2195 friction stir welds using a marker insert technique [J]. *Metall Mater Trans A*, 2001, 32(11): 2879
- 23 赵衍华, 林三宝, 吴林. 搅拌摩擦焊焊缝材料塑性流变研究概述[J]. *焊接*, 2005, (8): 5
- 24 Su J Q, Neslon T W, Mishra R, Mahoney M. Microstructural investigation of friction stir welded 7050 T651 aluminum [J]. *Acta Mater*, 2003, (51): 713
- 25 刘会杰, 陈迎春, 冯吉才. 中国搅拌摩擦焊技术的研究[J]. *焊接*, 2004, (12): 5
- 26 Sato Y S, Kokawa H, Enmoto M, et al. Microstructural evolution of 6063 aluminum during friction stir welding [J]. *Metall Mater Trans A*, 1999, 30A: 2429
- 27 Ma Z Y, Mishra R S, Mahoney M W. Friction Stir Welding and Processing II. In: Jata K V, Mahoney M W, Mishra R S, Semiatin S L, (Eds.). *Friction stir processing for microstructural modification of aluminum casting*. The TMS Annual Meeting. San Diego, California, US, TMS, 2003. 221
- 28 Genevois C, Deschamps A, Vacher P. Comparative study on local and global mechanical properties of 2024 T351, 2024 T6 and 5251 O friction stir welds [J]. *Mater Sci Eng*, 2006, (415): 162
- 29 Liu H J, Fujii H, Maeda M, et al. Tensile properties and fracture locations of friction stir welded joints of 2017 T351 aluminum alloy [J]. *J Mater Proc Techn*, 2003, 142(3): 692
- 30 Zhou C Z, Yang X Q, Luan G H. Fatigue properties of friction stir welds in Al 5083 alloy [J]. *Scr Mater*, 2005, 53: 1187
- 31 Lienert T J, Jata K V, Wheeler R. Proceedings of the joining of advanced and specialty materials III. ASM International Materials Park, OH, USA, 2001
- 32 Posada M, Deloach J, Reynolds A P. Proceedings of the Sixth International Conference on Trends in Welding Research, Pine Mountain, GA, ASM International, 2003
- 33 Nelson T W, Zhang H, Haynes T. Proceedings of the Second Symposium on Friction Stir Welding, Gothenburg, Sweden, 2000
- 34 张华, 吴林, 林三宝. AZ31 镁合金搅拌摩擦焊研究[J]. *机械工程学报*, 2004, 40(8): 123
- 35 Lee W B, Jung S B. The joint properties of copper by friction stir welding [J]. *Mater Lett*, 2004, 58: 1041
- 36 Mishra R S, Mahoney M W, McFadden S X, et al. High strain rate superplasticity in a friction stir processed 7075Al alloy [J]. *Scr Mater*, 1999, 42(2): 163
- 37 Ma Z Y, Mishra R S, Mahoney M W, et al. High strain rate superplasticity in friction stir processed Al Mg Zr alloy [J]. *Mater Sci Eng A*, 2003, 351(1-2): 148
- 38 Ma Z Y, Mishra R S, Mahoney M W. Superplasticity in cast A356 induced via friction stir processing [J]. *Scr Mater*, 2004, 50(7): 931
- 39 Ma Z Y, Mishra R S. Development of ultrafine grained microstructure and low temperature ( $0.48 T_m$ ) superplasticity in friction stir processed Al Mg Zr [J]. *Scr Mater*, 2005, 53(1): 75
- 40 Charit I, Maishra R S. High strain rate superplasticity in a commercial 2024Al alloy via friction stir processing [J]. *Mater Sci Eng A*, 2003, 359(1-2): 290
- 41 Arbegast W J. Friction stir welding after a decade of development [J]. *Welding J*, 2006, 3: 28

(责任编辑 何欣)