



# 搅拌摩擦焊接技术的研究进展和应用

熊建坤, 童彦刚

(重庆大学 机械工程学院, 重庆 400044)

**摘要:**搅拌摩擦焊是一种新型固相塑化焊接方法,可以有效地避免氧化和蒸发,焊后冷却过程中不出现热裂纹,焊缝区晶粒得到细化,优化了接头各项性能,同时焊接过程不需要填充金属,不产生火花、飞溅、烟雾、弧光等,是一种高效、节能、优质、简单、无污染的焊接工艺。介绍了搅拌摩擦焊的原理、焊接工艺特点、搅拌摩擦焊的最新发展情况及其应用。

**关键词:**搅拌摩擦焊;搅拌头;工艺

**中图分类号:** TG439.8

**文献标识码:** C

**文章编号:** 1001-2303(2008)01-0033-05

## Development and application of friction stir welding

XIONG Jian-kun, TONG Yan-gang

(Department of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Friction stir welding(FSW) is a late-model solid phase welding method, which can avoid the problems existing in the other welding methods. It's an efficient, energy saving, simple and environment-friendly technique, which can efficiently avoid oxidation and evaporation without heat flaw in the cooling process after welding. FSW can get optimized various performance of joint without any sparkle, splash, smog or arc. No filling metal is needed in the welding process. This paper simply introduces the principles, the process, emphasize introduces recent development and application of the friction stir welding.

**Key words:** friction stir welding; stirring head; technology

## 0 前言

搅拌摩擦焊是20世纪90年代初由英国焊接研究所(TWI)首先提出的,是一种新型的固相连接技术,简称FSW(Friction Stir Welding)<sup>[1]</sup>。与1950年发明的传统摩擦焊工艺相类似,搅拌摩擦焊属于固相焊接,所以搅拌摩擦焊除了具有普通摩擦焊技术优点外,还可以进行多种接头形式和不同焊接位置的连接。且搅拌摩擦焊具有工艺简单、无需焊前清理、能保持原合金的冶金性能、可焊接异种金属以及易于实现机械化与自动化等优点。因此,应用前景良

好。

## 1 搅拌摩擦焊原理

与常规摩擦焊一样,搅拌摩擦焊也是利用摩擦热作为焊接热源。不同之处在于,搅拌摩擦焊的焊接过程是由一个带有搅拌针和轴肩的特殊形式的搅拌头来完成,如图1、图2所示。

将搅拌针插入焊缝,使轴肩与工作表面紧密接触面,然后高速旋转搅拌头,摩擦迅速生热,搅拌针周围的金属温度升高,变成热塑性金属层,当搅拌头沿着焊件接缝运动时其前方的热塑性金属不断流向其后方,通过相互扩散与再结晶使焊件牢固地结合在一起形成焊缝。

收稿日期:2007-07-17

作者简介:熊建坤(1980—),男,四川遂宁人,在读硕士,主要从事轻金属的焊接研究工作。

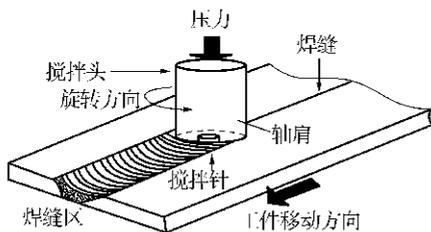


图 1 搅拌摩擦焊原理

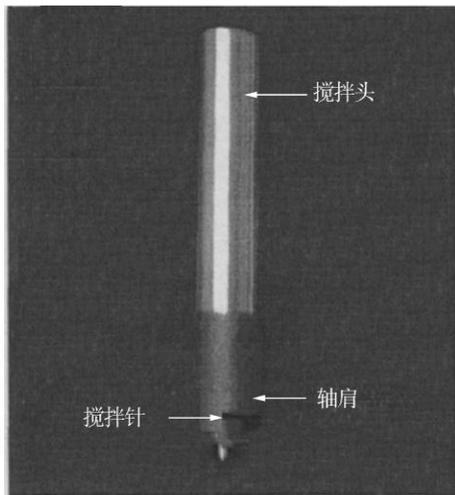


图 2 搅拌头

## 2 搅拌摩擦焊的工艺特点

采用搅拌摩擦焊不仅能焊接几乎所有熔焊能够焊接的金属,而且能焊接许多熔焊焊接性能差的金属,如铝合金、镁合金、铜合金等。

搅拌摩擦焊的主要优点为<sup>[2-3]</sup>:(1)焊接时温度并未达到母材的熔点,是一种固相焊接,不存在普通焊接中的凝固裂纹和气孔等缺陷;(2)温度低且工件被固定,焊接变形小,甚至没有变形,残余应力也小;(3)不需要填充材料和保护气体,大大节省了成本;(4)易于实现自动化;(5)能够焊接普通焊接方法难以焊接的材料。如 Al-Cu(2xxx 系列)、Al-Zn(7xxx 系列)、Al-Li(如 8090,2090 和 2195 铝合金)和各种镁合金;(6)焊缝多为等轴晶粒,其拉伸强度、疲劳性能、冲击韧性优良;(7)焊接时没有烟尘、飞溅和弧光,大大改善了劳动环境,是一种绿色的焊接技术。

但搅拌摩擦焊存在的缺点为:(1)焊接时必须刚性固定,反面应有底板;(2)焊接结束时在终端会留下匙孔,并且难以对焊缝进行修补;(3)在某些情况下,如特殊领域中要考虑腐蚀性能、残余应力和变形,性能需进一步提高才可实际应用;(4)工具设计、过程参数和机械性能数据只在有限的合金范围内;

(5)焊接速率低、搅拌头磨损较快等。

## 3 搅拌摩擦焊的研究进展

### 3.1 搅拌头的研究进展

搅拌头是搅拌摩擦焊核心部件,因此对搅拌头的研究是一个重要方面<sup>[4]</sup>。搅拌头的形状主要有圆柱形、圆锥形、螺旋形等。研究表明,螺旋形搅拌头在旋转的同时,产生向下的锻造力,更有利于焊缝金属的焊合及成形。

英国焊接研究所最早研制的 Whorl™ 和 MX Triflute™ 系列搅拌头如图 3、图 4 所示。

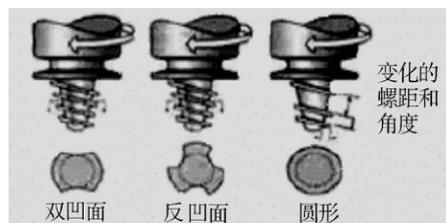


图 3 Whorl™ 系列搅拌头



图 4 MX Triflute™ 系列搅拌头

TWI 和 BOEING 等公司针对薄壁筒形件,开发出“Bobbin—线轴”搅拌头,其主要原理是利用搅拌头的双轴肩,使搅拌摩擦焊过程中产生的作用力相互抵消,从而消除了薄壁筒形件焊接时对工装夹具的依赖。

Trivex™ 是 TWI 开发的一种新型的搅拌头,如图 5 所示。这种搅拌头和 MX Triflute™ 搅拌头的最大区别就是表面不是凹槽而是凸面,且在外形加工上较带螺纹(表面螺纹会减小了搅拌头的强度和抗疲劳性)MX Triflute™ 搅拌头能容易加工。

A.P.Reynolds 在最新研究搅拌头几何形状和焊接工艺参数对铝合金搅拌摩擦焊接头性能影响的试验中,设计的搅拌头轴肩端面为一倾斜 7° 的凹面,可以有效防止塑化金属材料被挤出,避免焊接缺陷的产生。

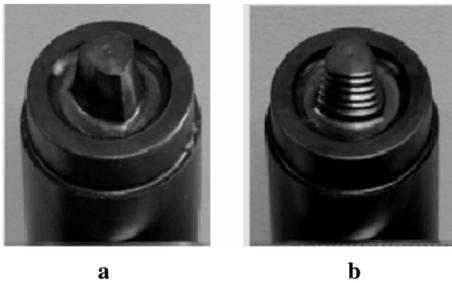


图 5 Trivex™ 系列搅拌头

### 3.2 搅拌摩擦焊塑性流动机理研究进展

对搅拌摩擦焊接过程的材料流动机理的研究尚处于探索阶段,研究方法主要有:钢球跟踪和停止运动技术。研究表明:并不是所有被搅拌头影响的材料都受到真正的搅拌,许多材料的运动只是简单的扩展。材料从焊接接头的上层部位被激活,被激活材料沿着搅拌头边缘向下运动填充空隙,其他材料只是沿着回撤面向上扩展,升到焊缝上部。

Y.Li 等人通过腐蚀焊接接头,得到不同的接头形貌,提供了一种观测塑性流体流动的方法,同时证明,塑性流体的流动随焊接旋转速度的变化而变化,随工具轴线的改变而有轻微变化<sup>[5]</sup>;K.N.Krishnan 分析了 FSW 接头“洋葱圆环”的形成原因,指出其与搅拌头几何形状和工艺参数有关,圆环的生成取决于塑性流体的运动,圆环的中心较密,外围较稀疏,圆环间隙与焊接工具每转前进的距离相等。

L.Cederqvist 和 A.P.Reynolds 提出了有效板厚概念 ETS(Effective sheet thickness)。母材界面上下移动的形状和大小是一个非常重要的参数,试验证明 ETS 和界面形状是影响抗剪强度的重要参数。

William D.Lockwood 指出,尽管 FSW 已经成功焊接了许多合金,但对硬铝合金焊接的应力情况还有待进一步研究。建立 FSW 接头在不同加载情况下的反应模型,模型可以详细地检测局部应力状态,不同焊缝尺寸的影响、性能等。William D.Lockwood 已建立一套模型,但是还没有找到模型预测和实际材料之间的对应关系。

### 3.3 搅拌摩擦焊微观组织和力学性能研究进展

K.N.Krishnan 和 K.V.Jata 等人利用透射电镜 TEM (Transmission electron microscope)、OIM(Orientation imaging microscope)、LM(Light microscope)等试验方法得到不同焊接条件下的微观组织。M.A.Sutton 认为改变搅拌摩擦焊焊接参数可以改变接头的微观组织,从

而改善接头性能;H.G.Salem 等人证明超塑性材料经 FSW 焊接后,仍保持较好的超塑性;Benavides 认为焊缝的晶粒尺寸从底部到顶部是逐渐增加的,但 FSW 焊接温度不高的情况下,这种差别很小,且在旋转速度降低时,晶粒尺寸减小。

J.Chao 等人研究了 FSW 焊接接头在动态加载情况下的力学性能,认为塑性流体行为方面的特点对辅助过程建模有很大的应用价值。南卡罗莱纳最近的研究表明,靠近搅拌头附近的应变速率可以达到 1 000/s,且材料应变速率易发生在较高温度的焊接过程。

### 3.4 复合搅拌摩擦焊接工艺研究进展

#### 3.4.1 Com-stir™ 搅拌摩擦焊

Com-stir™ 是一种新的搅拌摩擦焊(FSW)<sup>[6]</sup>,其特点是在旋转运动的同时兼有搅拌运动,与传统的 FSW 相比,Com-stir™ 有如下潜在的优势:

(1)能形成较宽的焊缝,有利于搭接和 T 型接头的焊接;(2)能有效地去除焊件表面氧化膜,且沿焊缝截面产生更均匀的热量,得到质量更高的焊缝;(3)由于降低了焊接或加工过程中产生的扭矩,所需的工件夹具更少;(4)更便于异种材料的焊接和点焊。

#### 3.4.2 激光辅助搅拌摩擦焊

激光辅助搅拌摩擦焊的原理是:由通用铣床和 Nd:YAG 激光器改造成,激光能源在旋转搅拌头前面预热工件,其体积、塑性增加,然后采用与普通 FSW 工艺相同的方法连接工件。

#### 3.4.3 双旋转搅拌摩擦焊

TWI 研究出一种新的搅拌摩擦焊技术,搅拌头由可以分别转动的搅拌针和外部轴肩两部分组成,焊接时中心的搅拌针与外部轴肩以各自不同的方向和转速独立旋转,这种焊接技术称为双旋转搅拌摩擦焊(dual-rotation friction stir welding)<sup>[7]</sup>。在传统的搅拌摩擦焊中,搅拌头的相对速度是从搅拌头中心由零开始增加,到轴肩最外围处达到最大,而双旋转搅拌摩擦焊技术能够显著改善搅拌头中心到轴肩外径的速度梯度。其优点有:

(1)对复合板材料焊接,分别选择适用于覆层材料和内部核心材料的轴肩及搅拌针的不同转速,可提供更理想的工艺条件;(2)采用相反方向旋转时,要求夹具提供的反作用扭矩可极大减小,有助于机器人设备的应用;(3)能够减小轴肩外径附近的焊接表面出现过热或熔化的趋势。

### 3.5 搅拌摩擦焊热循环和温度场的研究进展

McClure 采用 Rosenthal 方法建立搅拌摩擦焊三维准态温度场的数学模型,对搅拌摩擦焊过程中的热传导进行初步分析,是在假定为一个半无穷大物体的导热问题基础上进行的,因而与实际情况有较大出入;H.MirZahedul 等人采用模拟和试验相结合的方法,研究了 5454-0 铝合金厚板焊接过程中不同厚度经受的热循环过程,认为焊缝厚度方向存在温度梯度,从焊缝底部至表面,热循环程度逐渐增大;Frigaard 等人研究了 A.A6082 和 A.A7108 铝合金搅拌摩擦焊接头热影响区的热循环过程,分析不同参数下的热循环差异、对热影响区组织变化的影响以及焊接速度对热循环的影响;Y.J.Chao 和 Xinhai Qi 等人提出了“三维热传导模型”,假定轴肩与母材之间是一个固定值,通过误差纠正,不断修改热输入,直至输出结果与测量值一致;Zahedul、Khandkar 和 Khan 等人采用有限元计算方法和移动热源模拟了搅拌摩擦焊搭接接头的热传导;M.Song、R.Kovacevic 等人将搅拌摩擦焊接分为三个阶段,采用移动坐标系模拟 FSW 的热过程<sup>[6]</sup>;也有学者运用有限元方法分析了搅拌摩擦焊三维准稳态温度场,但其热源模型中没有考虑探针与工件摩擦产生的热量,对厚板而言,这个计算结果不能准确地描述焊缝中心搅拌头附近温度场的分布情况。

王大勇等人针对铝锂合金搅拌摩擦焊试件整体的热循环和温度场分布进行了细致研究;王希靖等人对铝合金搅拌摩擦焊做了温度场模拟;汪建华等人提出了搅拌摩擦焊的传热和力学计算模型。国内由于搅拌摩擦焊的研究起步晚,有关搅拌摩擦焊热循环和温度场研究较少。

### 3.6 搅拌摩擦焊焊接设备研究进展

瑞典的 ESAB 焊接设备制造公司与英国焊接研究所合作,研制了多种类型的搅拌摩擦焊设备,如多轴式、移动龙门式、轻便式和机器人式搅拌摩擦焊机。可以拼焊的板材面积为 3.4 m×4 m,单面可焊厚度 5~50 mm,最大焊接速度 2.6 m/min。美国 MT5 公司也生产不同型号的 FSW 设备,其生产的 PDS 搅拌摩擦焊机能进行三坐标控制操作,在平板上实现曲线焊接,该焊机还装有可控伸缩探针,可以解决 FSW 过程中的尾部匙孔问题。美国 CTC 公司制造了带有真空夹紧装置的搅拌摩擦焊设备,用于铝合金挤压型材和板材的焊接。

## 4 搅拌摩擦焊技术的应用

搅拌摩擦焊是固相连接技术,可焊金属范围广,接头力学性能优良,不需要填充材料,没有焊接烟尘和飞溅,焊前准备少和焊接变形小。特别是搅拌摩擦焊可焊接各种铝镁合金材料,如 Al-Cu、Al-Mg、Al-Mg-Si、Al-Zn、Al-Li 高强铝合金,同时也能得到优质的连接。因此搅拌摩擦焊具有广泛的应用前景,已经在航空、航天、船舶、建筑、交通等行业获得了广泛的应用。

### (1) 船舶制造和海洋工业中的应用。

船舶制造和海洋工业是搅拌摩擦焊首先得到商业应用的工业领域,主要应用于甲板、侧板、船头、防水壁板和地板、铝合金型材、船体外壳和主体结构件、直升机降落平台、离岸水上观测站、海洋运输结构件、帆船的桅杆及结构件、船用冷冻器中空平板等船舶零部件。

### (2) 宇航制造中的应用。

应用范围主要为:机翼、机身、尾翼、飞机油箱、外挂燃料箱运载火箭、航天飞机的低温燃料筒、军用和科学研究火箭和导弹等。

### (3) 铁路工业中的应用。

应用为:高速列车、轨道货车、地铁车厢和有轨电车、轨道油轮和货仓、集装箱体等。

### (4) 陆路交通中的应用。

搅拌摩擦焊在陆路交通工业中的应用主要为:发动机引擎、汽车底盘车身支架、汽车轮毂、液压成型管附件、汽车车门预成型件、轿车车体空间构架、卡车车体、载货车的尾部升降平台、汽车起重器、装甲车的防护甲板、汽车燃料箱等。

### (5) 建筑工业中的应用。

应用范围:铝合金桥梁、铝合金、铜合金、镁合金装饰板、门窗框架、铝合金管线、电厂和化学工厂的铝合金反应器、热交换器、中央空调、管状结构件等。

### (6) 电子工业中的应用。

主要应用于发动机壳体、电器连接件、电器封装等。

### (7) 其他工业领域的应用。

主要应用范围为:冰箱冷却板、厨房电器和设备、“白色”家用物品和工具、天然气和液化气储箱等。

## 5 展望

近年来,国内外科研机构、高等院校对 FSW 进

行了大量研究。从其研究结果和实践经验,结合我国的实际情况,应从以下几方面来发展。

#### (1)探索焊接缺陷。

针对搅拌摩擦焊接头中出现的孔洞、未焊合、飞边和沟槽等缺陷。通过研究在焊接过程中不同部位的焊缝金属经历的受热机理和塑性材料流动行为,探索缺陷产生的原因。

#### (2)完善有限元模拟条件。

有限元的灵魂是材料的本构关系。材料的本构关系不能仅靠数学推导得到,还要建立模型,得以一定的试验数据为基础。例如,建立搅拌摩擦焊热输入数学模型,将瞬态温度场转化为准稳态温度场,来模拟搅拌摩擦焊过程的温度场,从而进行焊接过程热力耦合作用的有限元分析。

#### (3)高熔点合金焊接的研究。

对传统熔焊方法来说“难以焊接”和“不能焊接”的高熔点合金(如低碳钢和钛合金等),用搅拌摩擦焊技术使高熔点合金在焊接领域得到进一步的实际应用。不断丰富和发展搅拌摩擦焊技术,研究对不同材料,怎样制定和优化合理的工艺参数,获得质量稳定、性能优良的焊接结构件。

#### (4)工艺改进。

建立完整的焊接参数数据库,可大大减少焊接参数的优化步骤,同时应进一步制定技术标准,开发新型设备、搅拌头、焊接接头等,拓宽应用领域。

#### (5)多学科的交叉融合。

焊接技术的不断发展需要各个学科相互交融,涉及到材料科学、应用物理、应用化学、计算机等多学科的交叉发展,建立基于材料热力学和动力学理论的计算技术,进行优化评估,预测各项性能及其对焊接质量的影响。

随着搅拌摩擦焊塑性流动行为的研究,复合搅拌摩擦焊接工艺、焊接过程热力耦合作用的有限元分析、各种典型材料搅拌摩擦焊工艺参数的优化和接头性能的评定、搅拌头形状的设计与优化以及异种金属间的连接等方面的研究工作的进一步深入,搅拌摩擦焊技术将不断得以完善,成为 21 世纪理想的“绿色”焊接技术。

### 参考文献:

- [1] Thomas W M, Nicholas E D, Needham J C, *et al.* Friction Stir Butt Welding[P]. International Patent application PCT. GB92,02203. GB Patent application 9125978, 8, 6 Dec. 1991 and US Patent 5,460,317.
- [2] 张田仓, 郭德伦, 陈沁刚, 等. 搅拌摩擦焊技术研究[A]. 第九次全国焊接会议论文集(第 1 册)[C]. 哈尔滨: [出版者不详], 1999: 514-517.
- [3] Kallee S W, Richardson D G, Henderson. Friction Stir Welding of a High Speed Ocean Viewer Vessel[J]. Welding and Cutting, 1997, 49(12): 178-179, 904-908.
- [4] Thomas W M, Nicholas E D, Smiths D. Friction stir welding tool development[C]. Paper Presented at the Aluminum Joining Symposium during the 2001 TMS Annual Meeting, 2001: 11-15.
- [5] Ying Li, Murr L E, McClure J C. Solid-state flow visualization in the friction stir welding of 2024 Al to 6061 Al[J]. Scripta Materialia, 1999, 40(9): 1041-1046.
- [6] 丁荣辉, 黎文献, 路彦军, 等. 搅拌摩擦焊接技术最新进展[J]. 轻合金加工技术, 2005, 33(2): 21-25.
- [7] Watts E R, Staines D G, Thomas W M, *et al.* Dual-rotation Welding[R]. Preliminary trials. TWI
- [8] SONG M, KOVACEVIC R. Thermal modeling of friction stir weld in a moving coordinate system and its validation[J]. International journal of machine tools manufacture, 2003, 43(6): 605-615.

### 弧焊电源及其空载电压要求

弧焊机中,供给焊接电弧电能,并具有适宜于电弧焊电气特性的设备,称为弧焊电源。设备中变压器、整流器或发电机以及所有其他各种电器元件,均视为弧焊电源的组成部分。

弧焊电源的空载电压是指在不负载状态运行时,即焊接回路开路时,弧焊电源的输出端电压。以  $U_0$  表示。弧焊电源的空载电压有如下要求。

当空载电压  $U_0$  较高时,电弧容易引燃,对于交流弧焊电源,空载电压高则电弧燃烧稳定。但空载电压高则相应设备体积大、质量大、功率因数低,不经济,此外也不利于焊工的人身安全,增加了焊工触电的危险性。为此在确保容易引弧、电弧能稳定燃烧的条件下,空载电压应尽可能低些。我国有关标准中规定各种弧焊电源的最大空载电压  $U_{0max}$  为:

弧焊变压器  $U_{0max} \leq 80 \text{ V}$ ; 弧焊整流器  $U_{0max} \leq 90 \text{ V}$ ; 弧焊发电机  $U_{0max} \leq 100 \text{ V}$  (单头焊机)、 $U_{0max} = 60 \text{ V}$  (多头焊机)。