

# 搅拌摩擦焊技术研究进展

姚君山<sup>1</sup> 张彦华<sup>2</sup> 王国庆<sup>1</sup> 孟凡新<sup>1</sup>

(1 首都航天机械公司,北京 100076)

(2 北京航空航天大学机械工程学院,北京 100083)

**文 摘** 综述了近十年来国内外搅拌摩擦焊技术的发展概况和最新进展,阐述了搅拌摩擦焊技术的原理和工艺特点及其广泛的工业应用前景,指出开展搅拌摩擦焊技术研究的必要性和紧迫性。

**关键词** 搅拌摩擦焊,搅拌头,固相连接,铝合金

## Progress in Friction Stir Welding Technology

Yao Junshan<sup>1</sup> Zhang Yanhua<sup>2</sup> Wang Guoqing<sup>1</sup> Meng Fanxin<sup>1</sup>

(1 Capital Aerospace Machinery Corporation, Beijing 100076)

(2 School of Mechanical Engineering, Beijing University of Aeronautics & Astronautics, Beijing 100083)

**Abstract** This article presents the recent year's development and latest progress on stir welding technology (FSW). The principle, technical characteristics and wide applications are discussed in detail. It is realized that it is necessary and urgent to develop the FSW.

**Key words** Friction stir welding, Friction stir welding tool, Solid-state joining, Aluminum alloy

### 1 引言

搅拌摩擦焊(FSW)技术十年前发明于TWI,是一项创新的先进摩擦焊技术。目前已成功用于铝、铜等合金板材的连接,在实验室条件下也完成了镁、锌、钛和钢材的搅拌摩擦焊连接<sup>[1]</sup>。

由于搅拌摩擦焊是固相连接,热输入低,所以接头力学性能优异,因而在许多工业领域获得了广泛应用。在航天工业中,美国已采用搅拌摩擦焊焊接高强铝合金燃料贮箱,并在1999年8月成功发射的德尔塔火箭贮箱上采用。NASA及洛·马公司正在评估该工艺用于连接2195Al-Li合金的可行性<sup>[2]</sup>。在造船和车辆工业,欧洲已有数家公司将该技术用于生产大型预制铝板<sup>[3]</sup>。用于研究和生产的搅拌摩擦焊设备已实现了商品化,其可焊板材的长度已达16m<sup>[4]</sup>。

随着有关搅拌摩擦焊过程中的塑性流动行为的

研究,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,异种金属间的连接等方面研究工作深入地进行,搅拌摩擦焊技术不断得到完善,其应用将更加广泛。

### 2 搅拌摩擦焊技术

搅拌摩擦焊是一项高效、低耗、低成本、环保的固相连接新技术。如图1所示,搅拌摩擦焊是利用肩台和搅拌头与工件间的摩擦热使接合面处的金属塑性化并在搅拌头和肩台的共同牵引、搅动作用下向后流动、填充形成固相焊缝的过程。

显然,搅拌头的外形轮廓与转速、焊接压力、工件移动速度是其关键工艺参数。只要搅拌头材料耐磨性足够好,搅拌摩擦焊就可以实现塑性化温度较高的材料间的连接。目前已在实验室实现了Cu、Ti等合金的连接。

收稿日期:2002-12-23;修回日期:2003-05-16

姚君山,1972年出生,博士后,主要从事航天铝合金结构搅拌摩擦焊和变极性等离子弧焊方面的研究工作

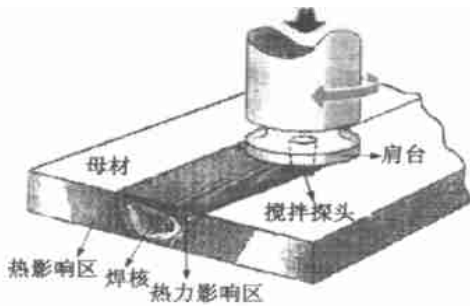


图1 搅拌摩擦焊原理和焊缝微观结构

Fig. 1 Principle of FSW and microstructure of FSW weld

由图1可以看到,搅拌摩擦焊的焊接区由母材、热影响区(HAZ)、热力影响区(TMAZ)和焊核(welding nugget)组成,其中热影响区、热力影响区和焊核由搅拌头的搅拌形变作用产生。研究表明,焊核由纤细的经动态再结晶的等轴晶构成,其晶粒尺寸比母材的晶粒尺寸小得多<sup>[5~8]</sup>。

作为一种创新的固相连接工艺,搅拌摩擦焊还适于连接同质或异质的宇航结构材料,尤其适于连接常规熔焊工艺难焊的高强铝合金。即使熔焊方法易于焊接的焊缝使用搅拌摩擦焊也可以显著提高接头的性能。由于控制参数少、易于自动化,可将焊接过程中的人为影响因素降到最低,其接头形式也多种多样,如图2所示。

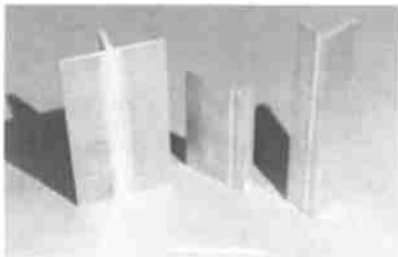


图2 搅拌摩擦焊接头形式

Fig. 2 Several types of FSW joints

在连接异质材料如挤压铝板和锻铝板或者锻铝板和铸铝板时,从焊缝的宏观横断面上可以清楚地看到搅拌头的搅拌效果<sup>[9]</sup>(图3)。洋葱环状的焊核结构是高质量搅拌摩擦焊缝的典型特征,其内部没有可检测到的气孔和空隙。

搅拌摩擦焊工艺的出现解决了铝铜合金(2014、2219)熔焊所产生的缺陷,消除了铝合金熔焊时元素

的挥发问题,改善了难焊轻合金的焊接性,如2XXX、7XXX系列中的难熔焊铝合金等;焊后均能获得无气孔、裂纹和焊接残余应力以及变形极小的高质量焊缝<sup>[8,10]</sup>。该工艺焊接环境良好,不产生烟尘、辐射类的危险物质,是一种原理简单、高效、不消耗焊材、易于自动化,有着巨大应用前景的先进摩擦焊技术,尤其适于航天贮箱、弹头壳体的焊接生产。

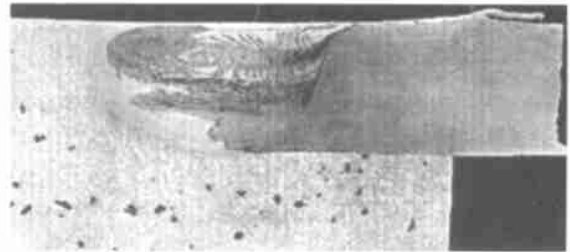


图3 6 mm厚锻铝与铸铝焊缝的宏观断面 50 ×

Fig. 3 Transverse macrosection of 6 mm thick wrought aluminum welded to cast aluminum

由以上分析可知,搅拌摩擦焊设备是一种完全基于机械运动和机电控制的焊接系统。因而在设备的实现和控制的柔性上没有不可逾越的障碍。其设备主要由搅拌摩擦焊机头、工作台和配套的工装夹具三大部分组成。搅拌摩擦焊机头是其核心部分,其主要功能有夹持搅拌头,集成搅拌头冷却系统,施加适当的焊接压力,实现搅拌头的转动和水平移动。

综上所述,搅拌摩擦焊具有以下优点:(1)细化的锻造组织,无气孔、裂纹和元素烧损等熔焊缺陷且焊缝质量高度一致;(2)利用现有机床、工具技术,无需专用动力,节省能源;(3)适于多种接头形式——对接、搭接及角接,适于变截面焊缝和异质材料间的连接;(4)焊缝表面平整,残余应力与变形极小;(5)一步工序,无需焊料;(6)高效,适于自动化焊接。

搅拌摩擦焊也有自身的局限性:(1)主要适于平直焊缝和环焊缝;(2)工装夹具要求较高;(3)焊后留有锁孔,给补焊带来一定困难。

## 2.1 搅拌头技术发展

搅拌摩擦焊依赖非自耗旋转的搅拌头伸入待焊工件的接合处并沿接合线移动来产生高质量的焊缝。搅拌头由夹持机构、肩台和搅拌探头构成。对于对接焊缝,搅拌探头的长度与待焊工件的厚度相当。焊接过程中,搅拌探头横穿结合面,而肩台则与

工件表面紧密接触防止塑性软化金属挤出。为满足工业使用要求, TWI 开发了外形设计独特的搅拌探头和优化设计的肩台, 美国 NASA 所属马歇尔空间飞行中心也开发出了自适应伸缩式搅拌头。新一代高效搅拌头的出现极大拓宽了搅拌摩擦焊的工业应用范围。

搅拌头采用抗磨材料制造。这种材料在高温时具有良好的静、动态性能。采用这种材料的搅拌头连接 5 mm 厚的铝挤压板时, 一次可以焊接 1 000 m 长的焊缝而不需要修补。

搅拌头的设计是搅拌摩擦焊技术的关键。新型搅拌头的设计必须系列化、标准化, 否则会造成不同设计、性能各异的搅拌头规格泛滥, 妨碍搅拌摩擦焊技术的推广应用。下面简介一下新开发的先进搅拌头。

### 2.1.1 凹槽/ 螺旋式搅拌头

搅拌探头的外形除常见的圆柱形外, TWI 还开发了多种外形的搅拌头, 包括截锥形、非圆截面、锥形螺纹和螺旋形<sup>[2]</sup>。其中凹槽螺旋式搅拌头(图 4)主要用于连接 6082—T6 铝合金板件, 25 mm~40 mm 厚度的接头采用单面焊, 40 mm~70 mm 厚度的采用双面焊。截锥体外形的搅拌探头带有螺旋状的纹路可以向塑性的金属施加一个向下的运动。

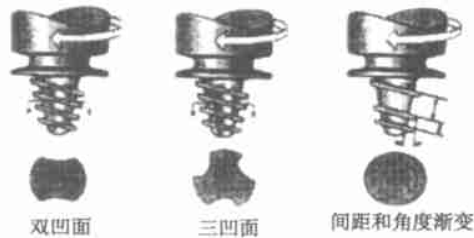


图 4 TWI 的新一代螺旋式搅拌头

Fig. 4 TWI's new generation of whorl type FSW tools

带有螺纹的非圆截面搅拌探头大大增强了焊缝金属的搅拌作用, 因而使得塑性金属更易流动。图 5(a) 为这种螺旋式搅拌头的外形和其焊接的 75 mm 厚的 6082—T6 铝板。从图中可以明显看到搅拌探头周围的热力影响区, 焊缝的力学性能和冶金性能也相当令人满意。试验表明, 当螺纹间距大于螺纹自身的厚度时, 焊缝金属可以获得更好的流动效果。这种搅拌探头的设计特性是螺纹间不必保持平行,

螺纹也不必保持统一的尺寸以适应不同材料的连接。

MX Triflute 是 TWI 为其开发的多螺旋线搅拌头注册的商标。这种搅拌探头的表面有奇数个带有陡峭角度的凹槽, 凹槽的表面环绕着粗糙螺旋线, 如图 5(b) 所示。这些设计特性将进一步减少搅拌探头的体积, 有助于焊缝金属的流动以及破碎和分散结合面的氧化物。



图 5 TWI 螺旋式和凹槽螺旋式搅拌头

Fig. 5 TWI's new whorl and triflute FSW tools

新一代螺旋式和多螺旋凹槽式搅拌头的肩台有着设计精巧的型面。这些肩台型面可以使肩台和工件表面间保持更好地接触以提供紧密的摩擦和防止塑性金属的溢出。通过特别设计的肩台型面如凹槽、螺旋和同心闭合凹槽可以截留住塑性金属以增强肩台和工件间的接触。带有同心闭合凹槽的肩台型面可以有效地增强塑性金属表面层的移动。

### 2.1.2 可伸缩式搅拌头

搅拌摩擦焊有两个主要缺点: 一是用于封闭焊缝会留下一个锁孔; 二是焊接变厚度材料需要更换不同长度的搅拌探头。为了克服上述缺点, NASA 所属马歇尔空间飞行中心设计了一种基于计算机控制的自动伸缩的搅拌头(图 6)。

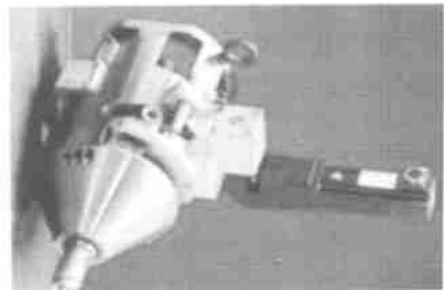


图 6 可伸缩式搅拌头

Fig. 6 Retractable pin tools

这种搅拌头在焊接收尾时由计算机控制自动退出工件,从而消除了锁孔问题。这种设计允许搅拌探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。

明尼苏达州的 MTS 系统公司和西雅图的 MCE 技术公司已开始向市场提供带有可伸缩搅拌头的先进搅拌摩擦焊系统。这种搅拌头的出现使得搅拌摩擦焊技术在汽车、造船及其他工业中的应用更具高效、通用和成本竞争的优势。

## 2.2 可焊的材料

作为一种创新的摩擦焊工艺,搅拌摩擦焊几乎可以连接所有的铝合金,包括熔焊方法难以焊接的某些铝锂合金及异质的铝合金,如 5XXX 和 6XXX 系列铝合金,甚至是 2XXX 和 7XXX 系列铝合金间的连接。焊接时无需保护气体和填充材料。目前, TWI 已开发出可焊厚度 1.2 mm ~ 75 mm 的铝合金搅拌头和相应的搅拌摩擦焊机。

TWI 使用专用的搅拌摩擦焊机焊接了用于封装核废料的铜质密封罐的模拟件。该模拟件材质为纯铜,焊接厚度达 50 mm。环焊缝的焊接速度可达 100 mm/min,焊缝性能优良。

搅拌摩擦焊还可用于连接锌、铅和镁合金板材。TWI 应用搅拌摩擦焊技术成功焊接了 9.5 mm 厚的 AZ61A 镁铝合金。试验表明,采用搅拌摩擦焊技术连接铸镁和锻铝也是可能的。日本 Shibaura 技术研究所已经应用搅拌摩擦焊技术对 6 mm 厚的 AZ31 镁合金热轧板材进行了焊接试验。研究表明,搅拌摩擦焊试件的强度与母材的强度相当。焊缝的力学性能对母材的组织状态并不敏感。

为使搅拌摩擦焊适于钢和不锈钢结构件的连接, TWI 等相关研究机构正在对搅拌头的材质进行系统的试验研究以寻求最佳的搅拌头用材。一旦搅拌头的材料确定,就可以开展搅拌头的设计和优化工作。这些工作还包括焊缝力学性能和冶金性能的评定以供潜在的用户对该工艺的使用进行切实的评估。

初步研究表明,搅拌摩擦焊工艺可以用于钛及钛合金的连接。目前 TWI 正在开展钛合金搅拌摩擦焊工业应用研究。最初的试验材质采用 TC4,现也进行其它钛合金的搅拌摩擦焊研究。

## 2.3 焊缝质量

宇航材料工艺 2003 年 第 4 期

焊接状态下,焊缝焊核的强度要大于热力影响区的强度。就退火状态的材料而言,拉伸试验的破坏通常发生在远离焊缝和热影响区的母材上。对于形变强化和热处理强化的铝合金,搅拌摩擦焊后热力影响区的硬度和强度最低,可以通过控制热循环,尤其是通过降低焊缝热力影响区的退火和过时效来改善焊缝的性能。为获得最佳的性能,焊后热处理是热处理强化材料提高焊缝性能的最好选择,但在许多工况下,焊后无法进行热处理。

英国的 TWI、瑞典的 Sapa 和挪威的 Hydro Aluminum 系统平定了 5083、6082 和 7108 三种铝合金搅拌摩擦焊缝的拉伸性能<sup>[2,8]</sup>。这些性能数据表明,对固溶处理加人工时效的 6082—T6 铝合金,其搅拌摩擦焊缝的拉伸强度经焊后热处理可以达到与母材等强,而延伸率有所下降。T4 状态的 6082 铝合金试件焊后经常规时效可以显著提高焊缝性能。7108 铝合金焊后室温下经自然时效,其拉伸强度可达母材的 95%。采用 6 mm 厚的 5083—O 和 2014—T6 铝合金焊件进行疲劳试验。当使用应力比  $R = 0.1$  进行疲劳实验时,5083—O 铝合金搅拌摩擦焊对接试件的疲劳性能与其母材相当。尽管疲劳试验所用的试件是单道对接焊缝,但试验结果表明,搅拌摩擦焊对接接头的疲劳性能大都超过相应熔焊接头的设计推荐值。疲劳试验数据分析显示,在绝大多数情况下,搅拌摩擦焊缝的疲劳性能要高于熔焊,并且数据的分散性很低。

要获得优异的疲劳性能,对接焊缝的根部必须全部焊上。和其它焊接工艺一样,进行搅拌摩擦焊时避免根部缺陷同样至关重要。如果搅拌探头的长度相对于试件的厚度太短,则工件仅仅是锻造在一起而没有将氧化层搅拌去除;无损检测方法很难探测到这类缺陷。如果焊件的厚度有很大的变化,就必须采用可伸长的搅拌探头以适应材料厚度的变化。此外工件的底边要机加工成倒角或在垫板上磨削一道沟槽以避免出现根部缺陷。为了填充工件间的间隙,接头区稍微加大厚度是非常有益的,也可以在垂直于焊缝方向往复进行压延处理。

## 2.4 搅拌摩擦焊机

迄今,已研制出多种搅拌摩擦焊机投入试验研究和工业应用。如上所述,美国 MTS 系统公司已开发出带有可伸缩搅拌头的液压驱动搅拌摩擦焊机,

其中一台安装于 South Carolina 大学,主要用于高强铝合金空间封闭焊缝和变厚度焊缝的工艺研究<sup>[2]</sup>。该设备的搅拌头可在  $\pm 15^\circ$  范围内自动倾斜,使用可伸缩式搅拌头可以对焊缝施加 90 kN 的焊接压力;使用常规搅拌头可以对焊缝施加 130 kN 的焊接压力;可焊厚度 30 mm;搅拌头转速 2 000 r/min 时,输出扭矩 340 N·m。1997 年 4 月, South Carolina 大学应用该设备完成了 NASA 的 EPSCoR 研究项目。

2001 年 6 月, MTS 系统公司为 Eclipse 航空公司提供了一套用于焊接 Eclipse500 商务机机翼和机身的搅拌摩擦焊设备。

美国 MCE 技术公司为马歇尔空间飞行中心配备了 2 台搅拌摩擦焊机用于航天贮箱纵缝和环缝的焊接研究。

美国 GIC 公司为洛·马公司生产了 3 台搅拌摩擦焊机用于航天飞机外贮箱的焊接。ESAB 作为英国 TWI 的搅拌摩擦焊工业研究成员,是世界领先的搅拌摩擦焊机供应商,其装机量名列前茅。ESAB 为波音公司共设计制造了 5 台 SuperStir 搅拌摩擦焊机,其中一台卧式焊机用于 Delta 火箭贮箱纵缝的焊接,2 台立式焊机用于 Delta 火箭贮箱纵缝的焊接<sup>[2,4]</sup>。

2001 年, ESAB 为 TWI 制造一台大型龙门式搅拌摩擦焊机。该焊机带有两个搅拌头,一个搅拌头用于高速焊,另一个用于大型板材的焊接,工作面积为 8 m × 5 m × 1 m。

澳大利亚亚特兰大大学机械工程系与 TWI 的工程师密切合作开发了一种轻便的搅拌摩擦焊设备<sup>[9]</sup>。目前已在实验室完成了曲面板材 1:1 模拟件的焊接试验。澳大利亚技术人员在海洋观光船的制造过程中许多平直焊缝都采用这一设备进行搅拌摩擦焊。

我国北京航空工艺研究所依据 TWI 授权也生产了多台研究用搅拌摩擦焊机,大大推进了搅拌摩擦焊技术在我国的研究与应用进程。

### 3 搅拌摩擦焊技术工业应用

#### 3.1 搅拌摩擦焊在航天工业的应用

目前,美国航天贮箱采用材质为 2195 铝锂合金和 2219 铝合金<sup>[4]</sup>。采用搅拌摩擦焊工艺可以显著提高焊缝的质量、减小焊接应力和变形、增强结构的可靠性。1997 年波音公司已将这种工艺用于焊接

Delta 型运载火箭贮箱的纵缝;并在阿拉巴马州的工厂安装了两台大型立式搅拌摩擦焊机用于 Delta 型火箭贮箱纵缝的焊接<sup>[4,11,12]</sup>(图 7)。



(a) 卧式



(b) 立式

图 7 用于 Delta 火箭贮箱焊接的搅拌摩擦焊机

Fig. 7 FSW machines to weld Delta launcher tanks

洛·马公司已经评定了搅拌摩擦焊工艺在各种铝合金及铝锂合金上的应用并购置了三台 GIC 公司生产的搅拌摩擦焊设备用于航天飞机外贮箱的焊接生产<sup>[4]</sup>。这些铝合金包括 2195、2014、2219、7075 及 6061,厚度在 2.3 mm ~ 38 mm 之间。所得焊缝的性能优于钨极气体保护焊:拉伸强度提高 15% ~ 20%,塑性提高一倍,断裂韧性提高 30%,焊缝收缩小,残余应力极低,焊缝组织为锻造的细晶组织,几乎无缺陷。

#### 3.2 搅拌摩擦焊在航空工业的应用<sup>[10]</sup>

欧洲航空工业公司在几年前就开展了两项有关搅拌摩擦焊的研究工作。项目之一是“飞机框架结构的搅拌摩擦焊(WAFS)”。该项目将历时 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。其内容涉及搅拌摩擦焊的标准化、1 mm ~ 6 mm 薄板搅拌摩擦焊焊接、6 mm ~ 25 mm 厚板搅拌摩擦焊焊接、搅拌摩擦焊焊接过程仿真与模拟和飞机搅拌摩擦焊零部件的设计与开发。

“宇航工业近期商业目标技术应用(TANGO)”是其第二个搅拌摩擦焊研究项目,由空客工业公司负

宇航材料工艺 2003 年 第 4 期

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搅拌摩擦焊焊接问题。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。

波音公司主要致力于飞机薄板对接、厚板对接和薄板T型搅拌摩擦焊接头在飞机制造中的应用研究。法国EADS合作研究中心正致力于飞机中心翼盒的搅拌摩擦焊应用研究。近期研究结果表明,搅拌摩擦焊具有良好的工艺再现性和较宽的工艺裕度:在转速波动 $-20\% \sim +40\%$ 和焊接速度波动 $-33\% \sim +100\%$ 的条件下,仍能得到优良的接头;长度为1500mm的焊件最大变形仅为2mm,经X射线和超声检查,接头无气孔和裂纹。

英国宇航客公司对飞机机翼结构的搅拌摩擦焊焊接应用进行了卓有成效的研究。

### 3.3 搅拌摩擦焊在造船工业的应用

造船工业是搅拌摩擦焊最早商业化应用的领域。渔船上用作冷冻处理的中空铝板是搅拌摩擦焊第一个应用。这些中空铝板结构由铝挤压板材直接搅拌摩擦焊连接而成。由于焊后变形很小和良好的工艺再现性使得搅拌摩擦焊成为生产这类刚性板件的首选方法。

从1996年1月至1999年12月,挪威的Hydro Marine Aluminum已经生产了1700块板材,其焊缝总长度已达160km<sup>[11]</sup>。这些板材焊后只在纵向上有刚性,因而可以卷起来陆运(图8),也可以堆叠在一起船运。

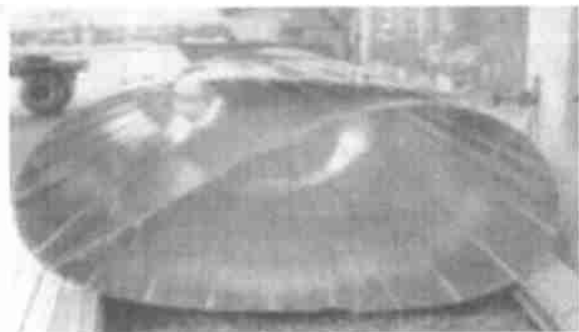


图8 双体船用预制搅拌摩擦挤压铝板

Fig. 8 Prefabricated FSW panel for catamaran side-wall, made with aluminum extrusion

澳大利亚的海洋观光船是一种24m长的全铝质单体船(其材料为5mm厚的5083H321铝合金),可以乘客112名并能以超过25节的速度行驶。该

宇航材料工艺 2003年 第4期

船的许多平直焊缝均采用便携式搅拌摩擦焊机焊接<sup>[11]</sup>。所有焊缝的表面采用照相的方法进行备案评估,其中有几条焊缝也采用超声波检测的方法进行评定。

搅拌摩擦焊的最新应用是日本的Sumitomo轻金属公司采用搅拌摩擦焊生产铝质蜂窝结构板件和耐海水的板材<sup>[13]</sup>。其中耐海水的板材由五块宽度为250mm的5083铝合金挤压板连接成一块尺寸为1250mm×5000mm的铝合金板。由于焊缝根部和背面具有良好的平整性而被用作船舱的壁板。

### 3.4 搅拌摩擦焊在其它工业的应用

机车工业中用于生产整流子和高速列车的中空型材目前已采用搅拌摩擦焊技术生产。在瑞典的Sapa,搅拌摩擦焊已用于铝质汽车零部件的大规模生产。这里安装了一台Esab生产的Superstir搅拌摩擦焊机。该焊机具有两个搅拌机头,可以从双面同时焊接中空铝板型材。这台搅拌摩擦焊机配备了一个转盘式加载和卸载装置,保证了焊接过程中两个机头的对中。针对轻质结构的汽车车身拼接,铝质汽车的设计者正在考虑使用不同厚度的铝质板材,采用带有斜面肩台的搅拌头在厚板一侧进行焊接以获得厚度平滑过渡的接头。数家汽车制造商正在对搅拌摩擦焊工艺进行应用评价。

最近发表的论文阐述了搅拌摩擦焊在装甲铝合金构件中的应用<sup>[13]</sup>。由于抗腐蚀性性能是装甲铝合金接头的重要考核指标,所以采用搅拌摩擦焊工艺可以在不损害母材抗腐蚀性性能的情况下获得高质量的焊缝。

## 4 结束语

从搅拌摩擦焊技术的工艺特性和设备实现来看,航天工业是搅拌摩擦焊工艺最具应用前景的领域之一。以新一代大运载研制为契机,大力开展搅拌摩擦焊在贮箱焊接生产上的工程应用研究,对于全面提升我国航天制造技术水平,增强航天产品的可靠性和国际竞争力具有深远的工程实际意义。

搅拌摩擦焊工艺实施的关键是面向产品的可靠焊接设备。但我国在这方面的研究工作才刚刚起步,尽快研制面向航天产品结构制造的搅拌摩擦焊设备已成为我国宇航焊接工作者所面临的一项紧迫任务。

(下转第52页)

加,所以晶须本身的性能相应就会下降,当然也就很难得到综合性能优异的复合材料。

表2 AB<sub>n</sub>1 增强 TDE-85/MNA 体系的性能<sup>1)</sup>

Tab.2 Properties of TDE-85/MNA reinforced with aluminum borate whiskers

晶须含量	弯曲强度	冲击强度	热变形温度
/ %	/MPa	/kJ·m <sup>-2</sup>	/
0	154.0	9.8	204
5	170.4	9.6	218
10	180.2	10.5	224
15	175.6	10.8	232
20	169.0	10.9	234

注:1) 晶须均是用 KH550 的丙酮溶液处理。

### 3 结论

(1) 在酸化的丙酮条件下,用偶联剂 KH550 处理晶须效果更好。

(2) 长径比较大的硼酸铝晶须的补强效果更佳。

(3) 硼酸铝晶须能有效改善环氧树脂体系的力学性能和耐热性能。环氧复合体系的弯曲强度随晶须的增加而增大,当晶须加入量超过一定量后,弯曲强度反而呈下降趋势,晶须对冲击性能的贡献较小;晶须的添加可以明显提高基体的耐热性。由实验可知,晶须以 10%~20% 的添加量为宜,最佳添加量

约为 15%。

### 参考文献

- 1 内田盛野著,石行,朱立群等译. 高物性新型复合材料. 北京:航空工业出版社,1992:74
- 2 潘金生,陈永华. 晶须及其应用. 复合材料学报,1995;12(4):1
- 3 袁建君,方琪,刘智恩. 晶须的研究进展. 材料科学与工程,1996;14(4):1
- 4 吕通建,隗学礼,赵宽放等. 钛酸钾晶须增强 PA6 的研究. 工程塑料应用,1995;23(6):5
- 5 Shirakama Yukitatsu, Ogawa Shogo. Thermoplastic resin composition. JP,11 349 801,1999-12-21
- 6 葛铁军,杨洪毅,韩跃新. 硫酸钙晶须复合增强聚丙烯性能研究. 塑料科技,1997;(1):16
- 7 刘玲,殷宁,亢茂青等. 晶须补强复合材料机理的研究. 材料导报,2000;14(6):46~48
- 8 郑亚萍,宁荣昌,乔生儒. 复合材料用高模量树脂基体的研究. 化工新型材料,1999;27(11):29~30
- 9 郑亚萍,宁荣昌,党小龙等. 环氧/咪唑固化体系性能研究. 工程塑料应用,2000;28(9):13~15
- 10 郑亚萍,宁荣昌. TDE-85/DDM 固化体系性能研究. 纤维复合材料,2000;17(3):15~17
- 11 廖明义,隗学礼. 镁盐晶须增强聚乙烯力学性能的研究. 塑料科技,1999;(6):41~43

(编辑 马晓艳)

(上接第 29 页)

### 参考文献

- 1 唐伟等. 搅拌摩擦焊及其在铝合金连接中的应用. 见:第九次全国焊接会议论文集,哈尔滨:中国焊接学会,1999;1:529~532
- 2 栾国红,郭德伦,张田仓等. 革命性的宇航结构件焊接新技术——搅拌摩擦焊. 航空制造技术,2002;(12):31~36
- 3 Dawes C J. An introduction to friction stir welding and its development. Welding & Metal Fabrication,1995;(1):12
- 4 夏德顺,王国庆. 搅拌摩擦焊在运载火箭上的应用. 导弹与航天运载技术,2002;(4):27~326
- 5 Jata K V, Semiatin S L. Continuous dynamic recrystallization during friction stir welding of high strength aluminum alloys. Scripta Mater.,2000;43(9):743~749
- 6 Rhodes C G, Mahoney M W, Bingel W H. Effects of friction stir welding on microstructure of 7075 aluminum. Scripta Mater.,1997;36(1):69~75
- 7 Benavides S, Li Y, Murr L E, Brown D, McClure J C. Low-temperature friction-stir welding of 2024 aluminum. Scripta Mater.,1999;41(8):809~815
- 8 Dawes C J, Thomas W M. Friction stir process welds aluminum alloys. Welding Journal,1996;75(3):41~45
- 9 Kallee S W et al. Friction stir welding of a high speed ocean viewer vessel. Schwei en und Schneiden,1997;(12):E178~E179,904~908
- 10 栾国红,郭德伦,张田仓等. 搅拌摩擦焊在飞机制造工业中的应用. 航空制造技术,2002;(11):31~36
- 11 Kar Erik Knipstim, Pekari Bertil. Friction stir welding process goes commercial. Welding Journal,1997;76(9):55,56
- 12 Johnsen Marry Ruth. Friction stir welding takes off at a Boeing. Welding Journal,1999;78(2):35~39
- 13 Campbell Genn, Stotler Tim. Friction stir welding of armor grade aluminum plate. Welding Journal,1999;78(12):45~47

(编辑 任涛)