

中国搅拌摩擦焊中心/北京赛福斯特技术有限公司 (100024) 栾国红 总经理



中国搅拌摩擦焊船舶制造已经扬帆启航

一、概述

一项新兴工业制造技术的发明、发展和工业化推广应用一般需要经过漫长的几十年甚至跨世纪的过程,焊接技术也一样,例如普通电弧焊、氩弧焊、电子束焊、激光焊、普通摩擦焊等。但是搅拌摩擦焊不同,1991年,作为世界材料和连接技术中心——英国焊接研究所(The Welding Institute-TWI),发明了搅拌摩擦焊(Friction Stir Welding-FSW),该技术从发明和申报专利之初到在工业化产品上得到成功应用(1996年)所经历的历程是所有任何焊接方法中最短的。搅拌摩擦焊的发明无疑是焊接技术发展史上最具革命性的里程碑之一,并且为世界工业制造技术的进步做出了贡献。

1996年,挪威MARINE公司,在铝合金船舶制造上正式采用搅拌摩擦焊技术,从此搅拌摩擦焊迈出了工业化应用的第一步。在船舶制造领域,搅拌摩擦焊已经成功应用在铝合金快速舰船的甲板、侧板等结构件的流水线制造。在铁路制造领域,日本HITACHI公司首

先于1997年就将搅拌摩擦焊技术应用于列车车体的快速低成本制造,成功实现了大壁板铝合金型材的工业化制造。欧洲铁路公司2004年开始也已经大规模在客、货列车方面广泛采用搅拌摩擦焊。在世界宇航制造领域,搅拌摩擦焊已经成功代替熔焊实现了空间运载工具如大型运载火箭和航天飞机等高强铝合金燃料储箱的制造,波音公司的DELTA II型和IV型火箭已经全部实现了搅拌摩擦焊制造,并于1999年首次成功发射升空。2000年世界汽车工业,如TOWER公司等就利用搅拌摩擦焊实现了汽车悬挂支架、铝合金车轮、防撞缓冲器、发动机安装支架以及铝合金车身的焊接。2002年8月,美国月蚀航空公司利用FSW技术研制出了全搅拌摩擦焊飞机,并且首次试飞成功。

1993年,搅拌摩擦焊得到了世界范围的知识产权保护。1995年,英国焊接研究所在中国就搅拌摩擦焊技术申请了发明专利。截至2004年9月,全世界已经有130家公司和组织得到了英国焊接研究所授权的搅拌摩擦焊非独占性专利许可,其中包括各个行业的公司、大学和研究机构;在中国(包括台湾、香港和澳门)已经有24家大学、研究所和企业得到了中国搅拌摩擦焊中心代理办法的搅拌摩擦焊专利许可。在世界范围内,从欧洲的英国、法国、德国、挪威,以及美国、加拿大,亚洲的日本等,搅拌摩擦焊已经成为工业制造领域轻合金材料如铝合金、镁合金等首选连接技术。

在中国,尽管早在1996年开始就有技术人员在尝试着探索搅拌摩擦焊技术的基础和机理,但是至到2002年4月18日北京航空制造工程研究所与英国焊接研究所签署搅拌摩擦焊专利许可协议及中国搅拌摩擦焊中心(北京赛福斯特技术有限公司)的成立,才标志着搅拌摩擦焊技术在中国的软着陆和发展的正式启动,从此中国焊接史上翻开了新的篇章。

随着搅拌摩擦焊技术的发展和应用的日渐成熟,市场对搅拌摩擦焊设备需求逐渐增多,世界范围内已经有近15家专业化的搅拌摩擦焊设备制造厂家,其中包括北京赛福斯特技术有限公司(中国搅拌摩擦焊中心)。到2006年底,该公司已经为国内客户设计开发了20台专业化的搅拌摩擦焊设

备。搅拌摩擦焊设备也从最初的铣床改造、专业化的机床式焊接设备,向数控、柔性、机器人等技术发展。

在世界范围内,搅拌摩擦焊已经作为一项产业化技术在宇航、汽车、飞机等领域快速发展。在中国,搅拌摩擦焊的技术开发、推广也初具成果,尤其是在中国船舶制造工业,搅拌摩擦焊已经在宽幅铝合金型材壁板结构中规模化应用,2006年赛福斯特公司在北京建立了国内第一个专业化的搅拌摩擦焊生产加工车间,批量化为国内主要舰船制造厂提供高质量的军用和民用宽幅(12m×5m)搅拌摩擦焊型材壁板,其中包括船甲板、外壁侧板和内装围板和隔板等。在中国,搅拌摩擦焊船舶制造已经扬帆启航。

二、搅拌摩擦焊原理和特点

搅拌摩擦焊之所以能举世瞩目并在世界制造工业得到广泛应用,主要是这种焊接方法原理非常简单,并且方便实用,特别是为铝合金的连接找到了一种到目前为止普遍认为最佳的焊接方法。

搅拌摩擦焊原理示意图1所示,一个中间带针状突起和轴肩的搅拌工具(搅拌头)旋转着插入焊接工件,并且沿着待焊界面移动,搅拌工具和工件之间产生的摩擦热使被焊接材料热塑化,通过搅拌工具的旋转摩擦,热塑化的金属材料从搅拌工具的前面向后壁过渡,过渡后的热塑化金属在搅拌工具轴肩的顶锻作用下,形成高质量的固相连接。

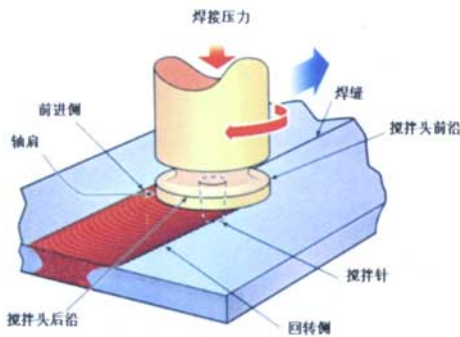


图1 搅拌摩擦焊原理

1. 搅拌摩擦焊的优点

基于方法的优越性,与普通弧焊相比较,搅拌摩擦焊具有如下优点:

- (1) 固相焊接,不存在热裂纹和气孔等熔焊缺陷。
- (2) 接头变形小、应力低。
- (3) 焊接过程不需要焊丝和保护气。
- (4) 绿色环保,没有烟尘、飞溅和UV辐射等。
- (5) 非常节能,一般为普通焊接能源消耗的1%~20%。
- (6) 焊接过程没有材料熔化,可以实现任意位置焊接。
- (7) 机械焊接技术,容易实现自动化,不需要特殊的技术培训和认证。

(8) 焊接质量优良,对于铝合金来说搅拌摩擦焊优于任何其他焊接方法。

2. 搅拌摩擦焊的局限性

(1) 焊接尾段通常存在“匙孔”。

(2) 焊接过程需要较大的顶锻力和驱动力。

(3) 欠缺普通弧焊和手工焊所具备的过程柔性。

但是,以上局限性随着技术的进步正在得到解决,例如,中国搅拌摩擦焊中心已经研制出焊接深度可调节搅拌头,成功解决了焊接“匙孔”问题,并且在火箭燃料储箱和导弹筒形结构零件的搅拌摩擦焊制造(如图2所示)。另外,随着焊接技术的发展,焊接工艺过程得到改进和优化,焊接顶锻力和驱动力大幅下降,据报道欧洲EADS公司利用500kg载荷的重型机器人,已经实现25mm厚度的铝合金的搅拌摩擦焊焊接,并且容易实现3D焊接,增加了搅拌摩擦焊结构柔性和适应性。



图2 无匙孔筒体结构搅拌摩擦焊接
(赛福斯特公司)

三、船舶铝合金的搅拌摩擦焊

从原理上讲,针对特定的材

料, 只要能够找到这种材料热锻压状态下可以有效工作的搅拌摩擦工具材料, 就可以实现搅拌摩擦焊连接。迄今, 搅拌摩擦焊已经可以实现所有种类铝合金材料以及铝基复合材料的焊接; 对于其他轻金属材料如镁合金、锌合金、铜合金、铅合金等也可以用搅拌摩擦焊焊接; 对于高熔点合金材料如钢合金、钛合金, 只要选择合适的搅拌头以及合理的辅助工艺技术, 同样可以得到可靠的搅拌摩擦焊接。

船舶制造中常用金属材料为钢合金, 但是考虑到船舶的重量及耐蚀等原因, 在高速船舶中广泛使用铝合金材料, 常用的主要有A15083-O、H112、H321和A16082-T6铝合金。A15083耐蚀性能优异, 主要应用于船舶的外侧与海水接触的具有防腐要求的壁板结构中; A16082热塑性能好, 并且可以热处理强化, 常用于船舶结构的型材结构中。

对于铝合金船舶制造来说, A15083和A16082都非常适合利用搅拌摩擦焊实现连接。A15083为非热处理铝合金, 搅拌摩擦焊参数窗口大, 工艺裕度大, 接头性能优异, 一般可以达到母材等强, 虽然室温机械强度较低, 但是在焊接温度高于200℃时热强性较高, 对搅拌工具的寿命要求较高; A16082一般为挤压型材材料, 出厂材料经过了热处理, 强度高, 搅拌摩擦焊接性好, 对搅拌工具的要求较低, 但是接头性能降低较多, 一般可以达到母材的75%以上。下表为中国搅拌摩擦焊中心得到的不同状态船用铝合金接头的搅拌摩擦焊性能结果, 图3为A16082搅拌摩擦焊拉伸接头和弯曲性能试验结果。

船用铝合金搅拌摩擦焊对接接头性能

材 料	厚度/mm	接头	焊接参数/mm·min ⁻¹	抗拉强度/MPa	弯 曲 性 能(°)	母 材 强 度/MPa	接 头 系 数
6082-T6	3	对接	1200/600	245	正、背弯180	320	0.756
	4		1200/600	240			0.75
	5		1500/700	240			0.75
	6		1800/800	230		300	0.76
5083H321	3	对接	1200/130	320	正、背弯180	338	0.92
	3.5		1200/300	323.16		333	0.97

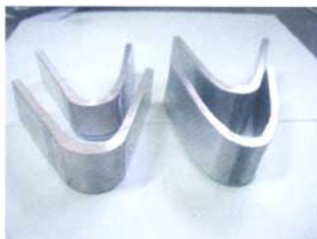


图3 5mm厚度6082铝合金拉伸及弯曲试验

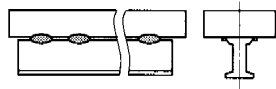
四、船舶焊接结构的搅拌摩擦焊设计

船舶制造中, 考虑到生产效率和成本因素, 船舶设计师和造船厂通常希望选用商业化的工业板材及型材作为铝合金船舶制造的初始材料。铝合

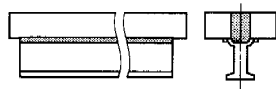
金型材在船舶制造中的使用可以有效提高船舶制造的标准化、批量化和节省时间。

对于船舶外侧, 尤其是经常与海水接触的部分, 考虑到耐腐蚀和焊接性, 结构设计通常为5083铝合金板材和6082挤压型材加强筋结构, 如图4a熔焊结构所示。但是搅拌摩擦焊不同, 如图4b所示, 中国搅拌摩擦焊中心开发了单面穿透焊接方案和如图4c所示的搭接搅拌摩擦焊方案。

针对单面穿透型搅拌摩擦焊摩擦焊结构方案, 目前已经完成了系统的对比研究, 首先在船舶725所进行了三点纵向抗弯对比试验, 测试结果表明穿透型搅拌摩擦焊船舶壁板结构(见图4b)的纵向抗弯能力大于断续熔焊(MIG)结构(见图4a); 其次, 还进行了加强肋条侧向扳倒试验对比, 试验过程和结果如图5所示。结果表明, 穿透型搅拌摩擦焊结构比熔焊焊接结构的抗侧失稳能力高。



(a) 断续熔焊结构设计



(b) 穿透搅拌摩擦焊接头设计



(c) 搭接搅拌摩擦焊接头设计

图4 不同焊接设计结构的船舶带肋加强壁板

对于铝合金船舶的内围壁板、甲板 and 上层建筑, 焊接接头的设计主要考虑结构的强度和重量, 所以一般采用6082-T6铝合金材料, 供货状态基本上为挤压型材。该种

型材焊接接头主要为对接形式,考虑到铝合金材料已经过T6状态的沉淀强化热处理,焊接过程会因为焊接热循环而强化相脱熔现象,与母材相比较焊接接头的强度有不同程度的降低,所以接口设计一般有一定幅度的加强高。搅拌摩擦焊区别于普通熔焊接头(如图6所示),搅拌摩擦焊接头不需要开坡口,但是由于焊接过程不添加焊丝,通常有加强高,并且为了减少搅拌摩擦焊侧向焊接力的作用,经常设计类似自锁的自作用结构。

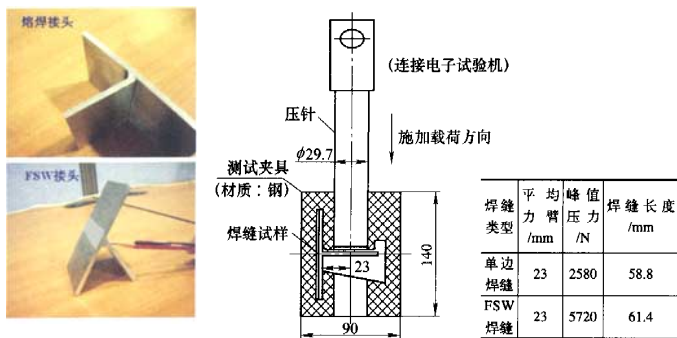


图5 船舶结构加强肋抗失稳对比试验及结果

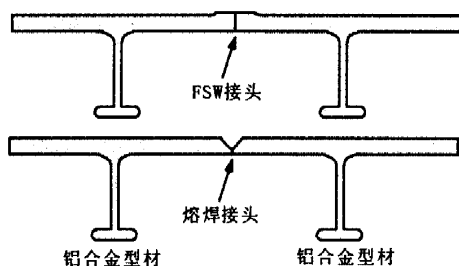


图6 不同焊接方法铝合金型材对接接头对比

五、宽幅船舶壁板结构搅拌摩擦焊制造

铝合金船舶的种类很多,从十几米的军用导弹快艇,到200多米长的大型豪华游轮,所以船舶制造需要的宽幅铝合金壁板种类较多,考虑到制造场地、吊装高度以及公路运输的因素,2006年我公司设计制造了国内第一台的宽幅船舶壁板结构型材搅拌摩擦焊设备(如图7所示)。

该搅拌摩擦焊设备采用了分体方梁设计模式,焊接设备主体和液压压紧横梁分离,零件的夹紧力



图7 中国第一台12m宽幅型材搅拌摩擦焊设备

不会影响主体设备的工作精度。自主开发的数控系统可以实现焊接参数的设定和适时调整,并且系统集成了多种工艺控制模式,可以根据零件种类以及结构不同分别实现恒位置控制或恒压力控制。该设备可以焊接2~6mm接头厚度的铝合金板材和型材,焊接产品尺寸(12m×5m)可以达到60m²(如图8所示)。



图8 赛福斯特公司制造的宽幅搅拌摩擦焊铝合金船舶壁板(60m²)

六、搅拌摩擦焊接宽幅型材在船舶制造中的应用

早在1996年挪威科学委员会就联合Hydro、Kvaerner、DNV、SIN-TEF,以及挪威科学与技术大学等对搅拌摩擦焊船用平板和型材拼接的流水生产线制造技术进行了开发研究,并且完成了把搅拌摩擦焊用于型材拼接成壁板技术的工程化和船级社认证。迄今搅拌摩擦焊已经在全欧洲:英国、法国、德国、挪威、瑞典等得到船级社认证,甚至美国、澳大利亚和日本的船级社也批准搅拌摩擦焊成为新型船舶制造工艺技术。在挪威和瑞典等生产的快艇和豪华游艇从设计开始就采用了搅拌摩擦焊预成形铝合金结构件和模块,实现了高效的船舶制造流水线生产,大约有

25%的船用铝合金壁板构件由搅拌摩擦焊制造, 总体成本可降低约5%。图9为搅拌摩擦焊宽幅铝合金型材制造的“Star Princess”大型豪华游轮。



图9 搅拌摩擦焊制造的大型豪华游轮“Star Princess”号

1. 搅拌摩擦焊接宽幅型材在船舶制造中的应用特点

在中国, 北京赛福斯特技术有限公司(中国搅拌摩擦焊中心)2006年在国内建立了第一个搅拌摩擦焊生产加工中心, 专门为我国高速铝合金舰船批量化生产宽幅带筋型材板, 从此中国铝合金船舶制造开始谱写新的篇章。

(1) 搅拌摩擦焊型材壁板的批量化制造彻底解决了我国船舶制造铝合金焊接方法问题, 简化了船舶设计难度, 结构设计不再需要考虑材料、焊丝等兼容性问题。例如, 搅拌摩擦焊可以把5083和6082铝合金直接焊接在一起, 甚至可以把铝合金和钢合金焊接在一起, 薄板和厚板焊接在一起, 锻压板材可以和铸造结构焊接在一起。

(2) 批量化定制的宽幅搅拌摩擦焊型材壁板降低了船舶制造厂的零部件制造的焊接工作量, 船舶制造由现场制造方式向标准化的车间流水线制造和现场装配方式过渡, 船舶制造的生产效率大幅度提高。

(3) 搅拌摩擦焊制造的宽幅铝合金壁板应力小变形少($<0.2\%$), 船舶零部件可以精确装配, 焊接接头力学性能提高, 结构重量降低, 结构变形得到大幅度改善, 船舶的整体外形尺寸形面和精度有质的飞跃。

2. 搅拌摩擦焊宽幅铝合金船舶壁板在船舶制造厂的推广应用

迄今, 搅拌摩擦焊宽幅铝合金船舶壁板已经在我国大连、上海、武汉、广西及广州等多家主力船舶制造厂推广, 并且已经在多个船舶制造项目中得到成功应用, 部分产品甚至已经在越南、密克罗尼西亚等出口船舶上得到应用(如图10所示), 船舶制造总体质量和效率明显提高。其中尤为突出的是搅拌摩擦焊制造的宽幅铝合金壁板已经在我国新研制世界领先的“双体穿浪隐形导弹快艇”(如图11所示)上得到应用。据2006年中国日报网站介绍国外评论: 中国推出的配备反舰巡航导弹的双体穿浪攻击型导弹快艇, 具有突出隐形性能, 能在海浪中快速穿行, 并具有双船体外形。双船体是一种较为先进的船体外形设计, 达到了世界水平。

另外, 搅拌摩擦焊铝合金宽幅型材壁板不仅可以在船舶外侧壁、内装

壁、甲板、上层建筑等制造中发挥巨大作用, 还可以在石油钻井平台、离岸水上观测站、直升机平台、轩梯、桥接板等海洋工业中得到推广应用。

总之, 搅拌摩擦焊应用于我国船舶壁板的制造直接提升我国的铝合金船舶制造能力, 推动了我国铝合金船舶制造向世界水平发展。



图10 搅拌摩擦焊制造在出口密克罗尼西亚铝合金船舶上应用



图11 中国最新研制的“双体穿浪隐形导弹快艇”(自中国日报网)

七、结语

(1) 搅拌摩擦焊是一种先进的铝合金焊接技术, 可以在铝合金船舶制造中推广应用。

(2) 搅拌摩擦焊可以实现变设计结构宽幅铝合金壁板的快速制造, 可以在简化设计、提高质量、生产效率和降低成本方面发挥革命性的作用。

(3) 搅拌摩擦焊在我国船舶制造行业的推广, 提高了我国船舶制造能力和水平, 促进了中国民族制造工业的发展。

(20070128)