

# 船舶焊接技术的现状及发展

邹家生, 严 铿, 顾晓波

(江苏科技大学先进焊接技术省级重点实验室, 江苏 镇江 212003)

**摘 要:**分析了我国船舶焊接技术的现状和发展趋势, 重点介绍了船舶高效焊接技术在焊接材料、工艺和装备方面的新发展。随着我国劳动力资源日益紧张和成本的不断提高, 船舶制造业大力推广应用高效焊接技术和机械化自动化焊接装备是必然趋势。

**关键词:**船舶焊接; 高效焊接; 焊接材料; 焊接装备

**中图分类号:** U671.8

**文献标识码:** A

## 0 引言

船舶焊接技术是现代造船模式中的关键技术之一。先进的船舶高效焊接技术, 在提高船舶建造效率, 降低船舶建造成本, 提高船舶建造质量等方面具有重要的作用, 也是企业提高经济效益的有效途径。先进的船舶高效焊接技术涉及到船舶制造中的工艺设计、计算机数控下料、小合拢、中合拢、大合拢、平面分段、曲面分段、平直立体分段、管线法兰焊接、型材部件装焊等工序和工位的焊接工程。同时也会牵动与之相关的焊接产业链, 如焊接材料、焊接设备和专用工装、焊接辅器具、金属的加工、焊接接头设计、焊接接头性能与质量控制、焊接标准与规范等。

## 1 船舶焊接材料的现状及发展

我国船舶建造焊接材料基本实现了国产化, 然而仍有部分焊接材料依赖进口, 如船厂大型平面分段流水线上的多丝埋弧焊焊丝和焊剂, 气电垂直自动焊工艺上的药芯焊丝, 双丝 MAG 焊的焊丝以及建造特种船舶如 LNG、LPG 船、化学品船等所用的焊接材料。

高效焊材在船舶建造中发挥极其重要的作用, 因此引起了世界各国的重视, 不断研究开发出新的高效焊接材料。进入新世纪, 根据我国造船工业发展的需要, 高效焊接材料会有更大的发展空间。从发展的方向来看, 可有以下几方面值得重视。

### 1.1 手工电焊条

向下立焊焊条: 与立向上焊相比, 效率提高 1 ~ 2 倍。

铁粉焊条: 熔敷效率可提高 130% ~ 240%, 生产效率提高 50% 以上。

重力焊条: 采用高效铁粉焊条(一般直径为  $\Phi 5 \sim \Phi 8\text{mm}$ , 长度为 550、700、900mm)。生产效率是常规手工焊的 6 倍。

### 1.2 气保护实芯焊丝

我国气保护实芯焊丝的品种太少(E49-1、E50-6), 今后应大力扩大品种, 同时也应进一步改进实芯焊丝的工艺性能, 降低飞溅, 成型美观。如研制开发的活性实芯焊丝, 表面活化处理, 并具备防锈、润滑功能等。

### 1.3 气保护药芯焊丝

从发展的趋势来看, 药芯焊丝将是 21 世纪船舶企业的主要焊材, 目前应用率已达到 60% 以上。其特点为焊道成型美观、电弧稳定、焊接飞溅小、全位置焊接工艺性能良好、焊接熔敷速度快、生产效率高。为此, 国内大部分船厂均实现了集中储罐式供气 and 焊接工位的焊丝盘托盘供应。

目前我国的药芯焊丝, 无论是数量、质量、品种与国外相比均有较大的差距, 应大力开发与研究: 如碱性药芯焊丝、自保护药芯焊丝、金属型药芯焊丝, 以及水下药芯焊丝和不锈钢、耐热钢、耐酸钢、低温钢药芯焊丝等。

### 1.4 其他焊接材料

随着我国焊接自动化程度的提高, 将大力发展多丝 MAG 焊、垂直立焊、全位置管线 MAG 焊, 以及机器人 MAG 焊等。无论是实芯焊丝和药芯焊丝, 在适应性方面都要进行大量的工作。

多丝埋弧焊也将有很大的发展空间, 焊丝、焊剂, 特别是烧结焊剂需大力发展。

单面焊双面成型的各类衬垫在高效焊接中也是不可忽视的。

收稿日期: 2008-01-28

作者简介: 邹家生(1965-)男, 博士, 教授, 江苏科技大学材料科学与工程学院副院长, 研究方向为新材料及其连接技术。

### 1.5 可持续发展的高效焊材

焊接是污染大户,有强光、噪音,并伴有大量烟尘、飞溅,污染空气和环境,时有职业病发生。因此,在发展高效焊材的同时,必须考虑可持续发展。根据我国《焊剂与切割安全》GB 9448-88的规定,各类焊接作业的烟尘量 $\leq 6\text{mg}/\text{m}^3$ 。然而,实际各工厂的焊接场地均超过此规定,特别是在车间和封闭的容器内,如在船舱内可达 $38 \sim 312\text{mg}/\text{m}^3$ ,碳弧气刨的烟尘量更大,达 $200 \sim 1\,300\text{mg}/\text{m}^3$ 。

不同焊条的烟尘速度及烟尘量见表1。不同焊材的平均烟尘速度及飞溅见表2。从表中数据可以看出,高效焊材(实芯及药芯焊丝)烟尘量最多,其次是低氢焊条。但各类焊材均超出规定的卫生指标。因此,发展各类高效焊材的同时必须降低烟尘量。减少飞溅,特别是对碱性低氢焊材尤为重要。

表1 不同焊条的烟尘速度及烟尘量

焊条类型	烟尘速度 $/(\text{mg} \cdot \text{min}^{-1})$	每 kg 焊条的烟尘量 $/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$
钛钙型焊条	200 ~ 280	6 ~ 8
高钛型焊条	280 ~ 320	7 ~ 9
钛铁矿焊条	300 ~ 360	8 ~ 10
低氢型焊条	300 ~ 450	10 ~ 20

表2 不同焊材的平均烟尘速度及飞溅

	焊条	实芯焊丝	药芯焊丝
烟尘速度 $/(\text{mg} \cdot \text{min}^{-1})$	200 ~ 450	400 ~ 600	500 ~ 850
飞溅 $/(\text{g} \cdot \text{min}^{-1})$	2 ~ 3	2.5 ~ 3.5	0.7 ~ 1.2

日本神钢研制出 I 系列的药芯焊丝,比同类药芯焊丝烟尘量和飞溅量减少 30% ~ 40%。这种 I 系列焊材主要通过调整药芯的组成物,如以  $\text{MgCO}_3$  部分代  $\text{CaCO}_3$ ,减少  $\text{CaF}_2$  及 K 的含量,以及适当减少激烈氧化等(降低钢带的含碳量)。

金属型药芯焊丝,也可减少烟尘及飞溅,并能提高生产率和改善焊接工艺性。采用活性焊丝可以提高焊接电弧的稳定性,减少飞溅。此外采用逆变电源亦可降低飞溅,改善焊缝成型。为了保护焊工的健康,焊接工位应安装通风、洗尘设备,特别是在封闭容器之内焊接时。

## 2 船舶焊接方法及设备

根据我国船舶企业造船模式的现状,可把企业分为三类。

第一类主要是众多的小型造船企业和沙滩船厂,属于整体造船模式。其焊接方法及设备的使用

现状为:平板拼接、管道焊接及船体焊接均采用硅整流式变压器手工焊条电弧焊,刚开始应用晶闸管式  $\text{CO}_2$  气体保护焊机。

第二类主要是地方造船厂和规模较大的民营造船厂,其造船模式属于分段造船模式。其焊接方法及设备的使用现状为:平板拼接采用  $\text{CO}_2$  气体保护焊机和晶闸管式埋弧焊机。平角焊、立角焊工艺采用  $\text{CO}_2$  气体保护焊和手工电弧焊。分段焊接亦以  $\text{CO}_2$  气体保护焊和手工电弧焊为主。管道焊接则采用 TIG 焊、 $\text{CO}_2$  气体保护焊和手工焊条电弧焊。其趋势是向以  $\text{CO}_2$  气体保护焊和焊接过程自动化为主的方向发展。

第三类则是中国船舶工业集团公司和中国船舶重工集团公司下属的大型企业,如外高桥船厂、大连船厂、沪东中华以及南通的中远川崎等,其造船模式已属于分道造船模式,并向更先进的集成造船模式发展。上述企业焊接方法及设备的使用现状为:平板拼接采用  $\text{CO}_2$  气体保护焊和晶闸管式埋弧焊机。平角焊、立角焊工艺基本为  $\text{CO}_2$  气体保护焊。区域连接应用气电立焊工艺。管道焊接为 TIG 焊和  $\text{CO}_2$  气体保护焊。其船舶焊接基本以  $\text{CO}_2$  气体保护焊和焊接过程自动化为主导,并开始采用机器人焊接。

所谓高效焊接技术是指与常规焊条手工电弧焊相比,熔敷速度快、焊接速度快、操作方便且易于自动焊的焊接工艺方法。其特点是生产效率高、焊接质量好、节约能源和材料、改善劳动条件和保护环境等。对于船舶制造可以大大缩短造船周期、降低造船成本,故对我国造船业来说,船舶焊接方法及设备的整体发展趋势应是向高效焊接工艺及设备发展。目前我国的第三类造船企业中高效焊接技术已占全部焊接工作量的 80%,但众多的中小船舶企业则相差很远。船舶高效焊接技术主要有:

- ①手工焊:铁粉焊条、重力焊、下向焊;
- ②气体保护焊: $\text{CO}_2$  气体保护焊、双丝 MAG 焊、垂直气电自动焊、TIME 焊;
- ③埋弧焊:单丝、多丝埋弧焊、窄间隙埋弧焊;
- ④单面焊:手工单面焊、 $\text{CO}_2$  气体保护单面焊、埋弧单面焊(FCB、FAB、RF 法);
- ⑤其他:电渣焊、激光焊、激光电弧复合热源、搅拌摩擦焊等。

下面介绍一些船厂常用的高效焊接技术。

### 2.1 熔化极活性气体保护焊(MAG)

MAG 焊自 20 世纪 50 年代以来得到广泛应用,日本已占 70% 以上。MAG 焊有自动和半自动两种方式。保护气可采用  $\text{CO}_2$  或混合气体,焊材可以是

实芯或药芯焊丝,其特点是高效、节能、质量好、成本低、易自动化。

(1)实芯  $\text{CO}_2$  气体保护焊:在国外一些大型船厂可占 50%。

(2)药芯焊丝  $\text{CO}_2$  气体保护焊(FCW):FCW 高效、节能、工艺性好、质量好。综合成本低,只有手工焊条的 1/2,埋弧焊的 1/3,  $\text{CO}_2$  实芯焊丝的 90%,飞溅少。

(3)TIME 焊:该工艺是在普通 MAG 焊工艺基础上开发的一种新的焊接工艺,在焊接质量明显改善的情况下提高了熔敷效率。TIME 焊和 MAG 焊角焊缝焊接效率比较如图 1 所示。



图1 TIME 焊和 MAG 焊角焊缝焊接效率比较

TIME 焊的工艺特点可简单的概括为:大的焊丝干伸长,高电弧电压,高速的送丝速度,提高热能和熔敷效率,达到高速、高效的焊接效果。大的焊丝干伸长意味着提高电阻热,采用高的电弧电压,大的电流的结果都能提高其熔敷效率,并在大电流的 MAG 焊禁区开创了新的应用领域。

(4)双丝或多丝 MAG/MIG 高速焊。特点为大幅度提高热效率和熔化率;大幅度提高焊速,可达 1~3m/min;明显降低生产成本。

双丝位置可前、后,亦可并排。保护气体:Ar 或 Ar +  $\text{CO}_2$ 。焊板下可装传感器,控制电弧电流,保证焊透及成型。

(5)自动角焊 MAG 焊。船舶焊接结构中,角焊缝比例特别高,提高角焊的自动化率极为重要。船厂应用的主要角焊设备有:

①简易  $\text{CO}_2$  自动角焊:适用于长直焊缝;

②T 排制作自动角焊:无需装配焊接,焊接速度快、焊接变形小;

③船体纵骨自动角焊:双丝双电弧,平直分段纵骨焊接,同时焊接四纵骨八焊缝。

(6) $\text{CO}_2$  气电立向自动焊。焊接时采用  $\text{CO}_2$  专用药芯焊丝,焊缝正面采用水冷铜滑块强制成形,反面借助于衬垫也同时成形的高效焊接方法。多用于船体合拢,比手工焊条焊提高效率 6~8 倍。

## 2.2 高效埋弧自动焊

①多丝埋弧焊:适用于船体平板拼接。

②窄间隙埋弧焊:适用厚板结构(100~

200mm),可比一般埋弧焊提高效率 2~4 倍,节省填充金属,降低能耗;

③立板横向埋弧焊:适于船体侧板组装的焊接。球形及筒形压力容器的横向组装焊缝(工地现场)。

## 2.3 单面焊双面成型

在船舶制造中采用最多的高效焊接工艺技术。

按衬垫种类分:铜衬垫、陶瓷衬垫、玻璃纤维及石英砂衬垫以及固化焊剂衬垫。

按焊接工艺方法分:手工焊条焊、埋弧焊、实芯和药芯的 MAG、MIG 焊。

(1)焊剂石棉衬垫单面焊(FAB)

FAB 法(Flux Aided Backing)利用柔性衬垫材料装在坡口背面一侧,并用铝板和磁性压紧装置将其固定。主要用于曲面钢板的拼接及船台合拢阶段甲板大口的焊接,如图 2 所示。

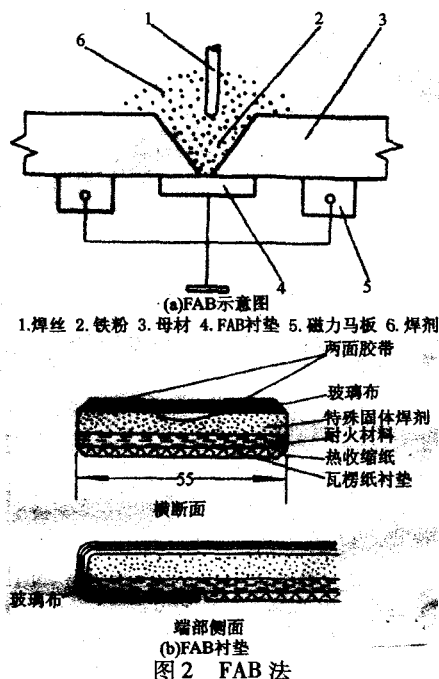


图2 FAB 法

(2)热固化焊剂衬垫单面焊(RF)

RF 法(Region Flux Backing)是采用一种特制的含有热硬化性树脂的衬垫焊剂,它的下部是装有底层焊剂的焊剂袋,如图 3 所示。

(3)铜衬垫单面焊 FCB 法

FCB 法(Flux Copper Backing)是采用焊剂铜衬垫及压缩空气加压。通常用双丝或多丝埋弧焊,第一丝常用直流,其他丝用交流电源,如图 4 所示。平面分段流水线 FCB 法三丝埋弧自动焊设备如图 5 所示。

## 3 船舶制造中的高新焊接技术

### 3.1 机器人焊接

机器人焊接是焊接自动化的最高水平,是计算机技术、自动控制技术、气体保护焊接技术的完美结合。适用于船舶构件批量化、小型化焊接生产以及狭窄舱室短焊缝全位置焊接。

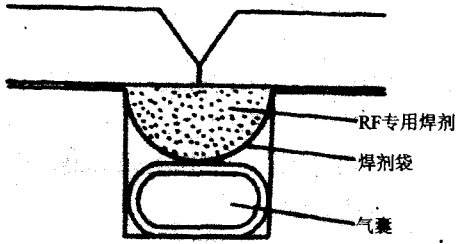


图3 RF法

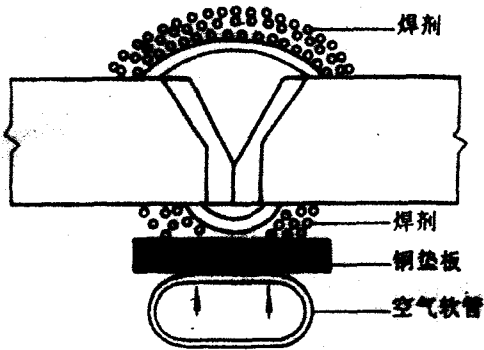


图4 FCB法

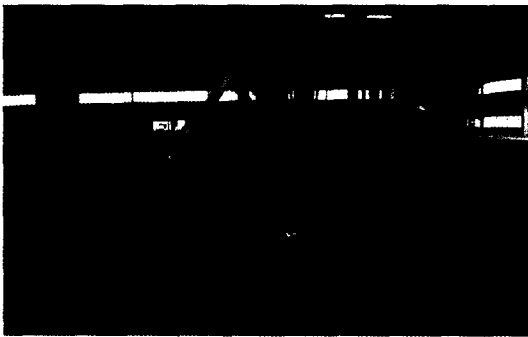


图5 平面分段流水线FCB法三丝埋弧自动焊

上世纪90年代日本船厂开始使用焊接机器人,韩国现代已研发出5种获得国际认证的焊接机器人用于船厂焊接。我国外高桥造船有限公司等单位已开始尝试采用机器人焊接技术用于船舶结构焊接。图6所示为昆山华恒焊接工程技术中心、江苏科技大学、上海外高桥造船有限公司联合研制的国内第一条船用管-管、管-法兰机器人焊接系统。

### 3.2 激光与电弧复合焊接技术

激光-电弧复合焊接技术是基于综合单独的激光焊接和电弧焊接而产生的。其原理如图7所示。

电弧焊接早已大量应用于生产,但其焊接效率低、变形大、耗材昂贵,对焊工要求高。激光焊接应用时间还不长,但由于其焊接功率密度高、熔宽比大、焊速快、变形小,得到了广泛的研发应用。值得

注意的是,大功率激光器价格昂贵,搭桥能力差,对焊接预处理要求高。

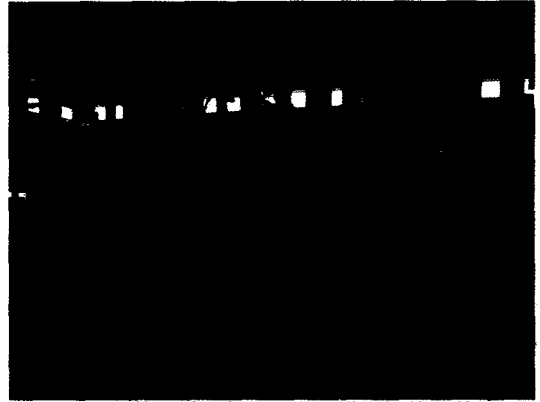


图6 管-管、管-法兰机器人焊接系统

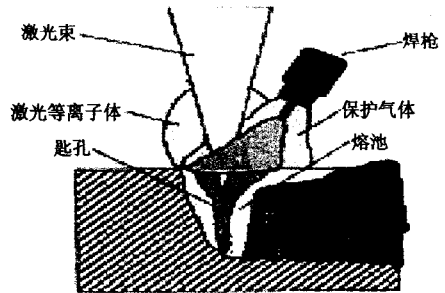


图7 激光-电弧复合焊原理

将激光、电弧复合起来,同时作用于焊接件,其效果不只是两种焊接作用的简单叠加,而是可以起到“1+1>2”的协同效应。

激光与电弧复合焊接技术特点:可有效利用激光能量。电弧先熔化母材,提高激光吸收率;增加熔深,利用激光束作用于熔池底部,进一步提高熔深;稳定电弧,激光使气体电离产生等离子体,有助于稳定电弧;降低对焊缝装配精度要求,装配间隙可由0.3mm增大至1mm。

激光-电弧复合热源是一种高效率的焊接方法。这种方法能够改善某些材料的可焊性,像铝合金、异种材料等。由于激光与电弧的相互作用,焊接速度提高了,焊接循环周期缩短了,而且达到同样的焊接效果所需的激光功率大大降低了,这些都能使焊接成本大大降低。因此激光-电弧复合焊接技术,无论是从工艺角度,还是从经济角度来看都具有广阔的发展和应用前景。

### 3.3 搅拌摩擦焊

搅拌摩擦焊是在原摩擦焊的基础上,利用一种相对比母材稍硬的摩擦头,接触在待焊的部位,在一定压力下摩擦头旋转生热使该部位处于塑性状态,从而实现焊接。中国搅拌摩擦焊工程中心为江苏科技大学制造的搅拌摩擦焊设备如图8所示。

(下转第33页)

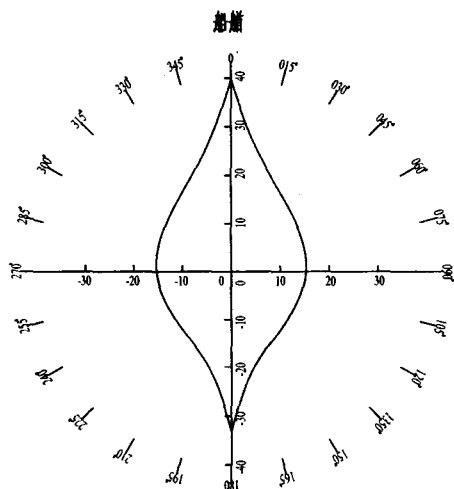


图3 DP系统各向定位能力示意图

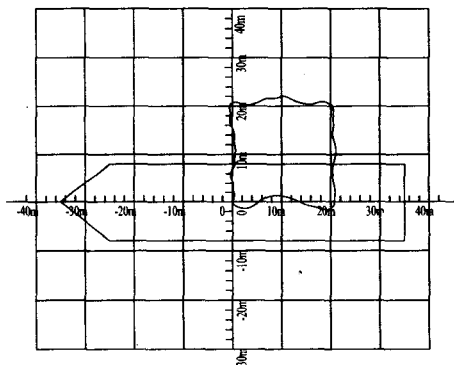


图4 实船定位效果图(根据屏幕截图绘制)

1kn 流速,4m/s 风速海况下,系统指令完成左、右、前、后 20m 矩形移动测得的定位效果图(根据屏幕截图绘制),由图可见定位精度在 3m 以内。但此定位精度是基于 DGPS 参考位置精度的基础之上的相对误差,船舶相对于海床实际定位误差的最大值应当加上 DGPS 的定位精度。假设此误差为 3m,积累误差最大值可能达到 6m。因此,船舶要求近距离、高精度定位或跟踪时优先考虑激光定位。

## 6 DP 系统的发展动态

国外有 KONGSBERG、ALSTOM 等多家船舶配套设备厂商提供全套动力定位设备。

最近国内首套动力定位系统也在哈尔滨工程大学研制成功,并交付使用。该系统应用了差分全球定位系统,数字滤波技术,以及最优控制软件等先进技术,使其定位精度在几米之内,达到当今世界先进水平。该系统不仅应用于停船定位,而且还能应用于船与船间的航距固定。

据有关报道,中远船务承建的 GM4000 半潜式可移动海洋石油平台装配了最高等级的 DP3 动力定位系统,集钻井、完井、海上建设服务功能于一体,该平台能在恶劣海洋环境下作业。

(上接第4页)



图8 搅拌摩擦焊设备

搅拌摩擦焊属固相焊接,与传统的熔化焊接相比,它无强光,无飞溅,无烟尘,不需要焊材,接头无气孔、夹渣及裂纹等,并具有细晶组织,属于优质、无污染的焊接技术。

搅拌摩擦焊适用于制造大型船舶铝合金结构

件,国外已采用此技术生产预成型结构件,使船舶制造由零件的制造转变为船舶甲板以壳体的预成型结构件的装配。但搅拌摩擦焊尚难以焊接形状比较复杂的焊接结构,随着科技进步,将会有所突破。

## 4 结语

随着我国劳动力资源日益紧张和成本的不断提高,将给船舶制造企业带来不小的压力。但这也为船舶制造业高效焊接技术和机械化自动化焊接装备的推广应用带来了契机。减少焊工与增加焊接设备投资,在两者费用达到某一平衡点的时候,采用机械化自动化焊接装备的利显然要比采用人工所带来的利大。它一方面可大大提高生产设备的自动化水平,从而提高劳动生产率,同时又可提升企业的产品质量,提高企业的整体竞争力。虽然机械化自动化焊接装备一次性投资比较大,但它的日常维护和消耗的人工费用小。因此,从长远看,造船的生产成本还会大大降低。