

# 大功率柴油机排气阀机器人焊接系统及工艺

## High Power Diesel Engine Exhaust Valve of Robot Welding System and Process

江苏科技大学江苏省先进焊接技术重点实验室 周方明 殷小青 缪保海 徐威

**[摘要]** 为了提高船舶焊接质量,采用机器人柔性化焊接系统堆焊镍合金阀盘。设计了高效、高质量的机器人焊接系统,对 SNCrW 不锈钢进行了焊接工艺研究,并对样件进行了检验分析。经检验,不存在超过 0.06mm 的缺陷,完全符合阀盘质量检测标准,属于合格产品,完成了国内首个高质量镍基堆焊阀盘的焊接。

**关键词:** 船舶 机器人 堆焊 镍合金

**[ABSTRACT]** In order to improve the welding quality of ship, flexible welding robot system is used to weld nickel alloy valve disc. High efficiency and high quality robot welding system is designed, SNCrW stainless steel welding technology is studied, and test samples are analyzed. After the inspection, there is no size more than 0.06mm defect, it is fully in line with the valve disc quality testing standards that belongs to qualified products, and the first domestic high quality nickel based hardfacing layer metal valve disc welding is performed.

**Keywords:** Ship Robot Surfacing welding Nickel alloy

早在 20 世纪 90 年代,发达国家已把机器人技术应用用于船舶制造业,建设了无人化船厂<sup>[1]</sup>。韩国由于引进西方技术加上低廉的成本及政府的支持,利用自动化和机器人技术实现自动化、智能化的生产,造船工业迅速崛起并超越日本,成为世界第一造船大国<sup>[2]</sup>。

焊接机器人系统凭借焊接过程稳定、能提高焊接质量和生产率、改善劳动条件等优点已广泛应用在我国的汽车制造业、航空航天<sup>[3]</sup>、工程机械业中<sup>[4]</sup>。上海汇众汽车制造有限公司在制造桑塔纳等轿车的后桥、副车架等轿车底盘零件以多台焊接机器人系统组成焊接生产线在汽车工业中得到了大量的应用,具有明显的技术、经济优势。在航空航天工业中,主要应用在外贮箱的焊接和耐高温不锈钢主发动机的焊接<sup>[5]</sup>。

《船舶工业“十二五”发展规划》提出:“环渤海湾、长江三角洲和珠江三角洲造船基地成为世界级造船基地,到 2015 年要成为世界造船强国<sup>[6]</sup>”。目前,我国已

经进入世界造船大国方阵。面向未来,中国的造船业不仅要做大,而且要做强<sup>[7]</sup>。

我国船舶制造业的机器人应用几乎处于空白状态,我国船舶焊接的柔性自动化、机械化率极低<sup>[8]</sup>,如果用机器人带动精细造船,将更有利于促进整个国家机器人产业的发展,增强与跨国公司竞争的能力,进而促进我国船舶工业现代造船的跨越发展。国内船用低速柴油机排气阀广泛采用表面堆焊的方法,由于采用手工焊和半自动焊无法精确精细化焊接,使得堆焊的产品存在严重缺陷,在使用过程中容易出现断裂、裂纹、堆焊层脱落等问题<sup>[9]</sup>。但是该技术被少数发达国家所垄断,因此采用机器人柔性化焊接镍基阀盘,打破发达国家在该行业的垄断地位迫在眉睫<sup>[10]</sup>。

## 1 机器人焊接系统设计

机器人焊接系统由机器人本体、控制柜、焊机、两轴变位机、送丝机组成。机器人焊接系统带有焊缝起焊点接触寻位装置与实时电弧跟踪系统。弧焊机器人系统总体布局如图 1 所示。



图1 弧焊机器人系统总体布局

Fig.1 General disposition of welding robotic system

### 1.1 机器人本体

为了保证焊接过程中焊枪的姿态能够随时调整,以及焊接过程稳定可靠,在焊接机器人的选择上基本都采

用点驱动的 6 轴关节式机器人,其中 1、2、3 轴的运动是把焊枪送到不同的空间位置,而 4、5、6 轴的运动是解决焊枪的姿态问题。本系统选用 KUKA KR16 型焊接机器人。

### 1.2 控制柜

选用 KUKA 公司的 KRC 2 型控制柜,该控制柜既考虑有足够的空间安装所需的电器设备及元件,又能够实现对整个系统的控制功能,且结构布局合理、操作方便。控制柜内,前面安装有可编程控制器、继电器、开关电源、电源插座等元器件,后部全部用来安装接线端子排;其他的接线则全部集中存放于控制柜的下部空间。

### 1.3 焊机的选择

本系统采用 Fronius 的 TPS 5000 数字化焊接电源。焊机内部控制系统采用的是数字信号处理器,统一控制焊机和调节整个焊接过程。实时监测实际参数值,对任何变化都能即时反馈。因此,焊机可达到极高的精度,极佳的重复一致性,得到完美的焊接特性。它的主要参数性能见表 1。

表1 TPS 5000 主要性能参数

主要参数	值
电源电压 /V	3 × 400
电源电压范围 /%	± 15
电网频率 /Hz	50 或 60
MIG 和 MAG 焊的主要电流范围 /A	3 ~ 500
每 10min 负载持续率 (500A/40°C)/%	40
每 10min 负载持续率 (360A/40°C)/%	100
焊机外形尺寸(长 / 宽 / 高)/mm	625/290/475
焊机重量 /kg	35.6

### 1.4 变位机

选择焊接变位机时需要注重其性能——较宽的调速范围、稳定的焊接运行速度、良好的结构刚度,并对尺寸和形状各异的焊件要有一定的适用性。本机器人系统的外部轴是 DKP400 的 2 个轴,分别是 E1、E2。视工件尺寸和工艺方法的不同,其到位精度和运行轨迹精度(轮廓控制)应控制在 0.1~2mm 之间,最高精度应可达 0.01mm。

### 1.5 送丝系统

系统中机器人运动的空间范围较大,为减小送丝阻力,提高送丝稳定性,系统采用一体式送丝机。将送丝机安装在机器人上臂的后部,用托盘托住,使用紧固螺栓与机器人之间紧固。由于选用不锈钢焊丝,

因此送丝软管承受较大的阻力,在这种条件下为了保证送丝的顺畅,特使用 2 对送丝驱动辊轮。送丝轮需要控制好压紧情况,太紧会造成阻力过大,焊丝不能正常送出,严重会造成断弧现象;太松不易控制焊丝,会出现焊丝在送丝软管中打滑的现象,经测定前一组轮压紧量为 3.0mm、后一组轮压紧量为 2.5mm 时送丝系统顺畅,焊接过程稳定。

## 2 机器人焊接工艺研究

### 2.1 母材和焊材分析

#### 2.1.1 母材化学成分分析

母材为高合金奥氏体不锈钢 SNCrW。固溶态的组织为奥氏体,组织分布较为均匀。其化学成分见表 2,力学性能见表 3。

表2 阀门钢SNCrW成分

成分	碳	硅	锰	磷	硫	镍	铬	钨	铁
质量分数	0.25~0.30	1	1	≤ 0.04	≤ 0.03	10	20	2	余量

表3 阀门钢SNCrW力学性能

性能	值
抗拉强度 /MPa	700~850
屈服强度 /MPa	350
延伸率 /%	26
断面收缩率 /%	45
布氏硬度 HB/MPa	190~240

#### 2.1.2 焊材化学成分分析

Inconel 718 是以体心四方 Ni<sub>3</sub>Nb( $\gamma'$ ) 和面心立方 Ni<sub>3</sub>(Al, Ti, Nb) ( $\gamma'$ ) 强化的镍铁基合金。 $\gamma'$  相为弥

表4 Inconel 718耐磨实心焊丝成分

成分	镍	铬	钨	铌	碳	锰	硅	硫	钛	铁
质量分数	50	20	3	5	0.08	0.4	0.35	0.15	1.15	余量

表5 Inconel 718力学性能

性能	值
抗拉强度 /MPa	965
屈服强度 /MPa	550
延伸率 /%	22
断面收缩率 /%	35
布氏硬度 HBS/MPa	277

散分布的面心立方结构,在合金中主要起强化作用, $\text{Ni}_3\text{Nb}(\gamma')$ 属于斜方晶结构,形状为短粗的片状。Inconel 718 耐磨实心焊丝成分见表 4,力学性能见表 5。

## 2.2 焊接性分析

### 2.2.1 气孔倾向性

镍及镍合金在液态时的流动性较差,即具有较大的粘度,气泡浮出困难,有较大的气孔倾向性。另外,在焊接过程中,溶解于液态镍中的氧在温度高于镍的熔点时可能与镍结合成氧化亚镍,给后续的焊接过程造成困难,因为氧化亚镍  $\text{NiO}$  与镍形成低熔共晶体,且结晶时氧化亚镍包在晶粒周围,从而使金属结晶变得松弛。结合成的氧化亚镍可以分别与碳和溶解在镍中的氢发生反应析出水蒸气和一氧化碳气体。虽然  $\text{NiO}$  得到了还原,但所生成的水蒸气和一氧化碳在熔池凝固时来不及逸出,就会在熔合线附近形成气孔,多层焊中的气孔如图 2 所示。

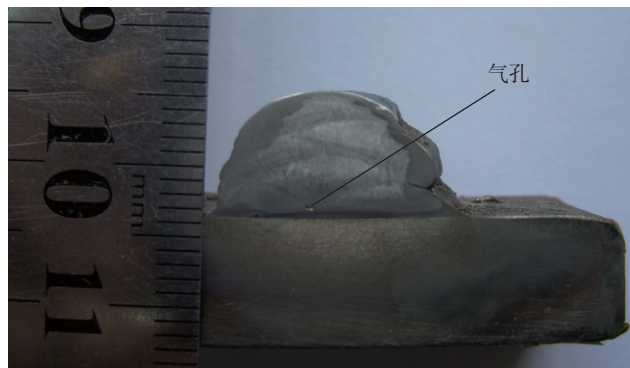


图2 多层焊中的气孔  
Fig.2 Blowhole in multilayer welding

为此,采用控制热输入的方法,对工件进行焊前预热改善以上问题。

### 2.2.2 热裂纹倾向性

镍合金与不锈钢焊接时,有时会产生裂纹。主要原因在于焊缝具有树枝状组织,这些组织晶粒粗大,且在晶粒边界上集中了一些低熔点共晶体,共晶体的脆性大、强度低,在焊接应力的综合作用下极易形成裂纹。

为解决以上问题,提出了以下对策:(1)对工件进行整体预热,减小堆焊层的拉应力;(2)避免连续多层堆焊,防止堆焊部位过热,能减小应力防止堆焊层裂纹和剥离。

### 2.2.3 未熔合

由于镍和镍合金的流动性差,焊缝对母材的润湿性差,焊缝不铺展,多层多道焊时易造成层间未熔合;另外,采用自动熔化极氩弧焊焊接时,电弧不稳定和导电

嘴瞬间导电不好,会造成焊缝中层间或道间的未熔合,焊缝中存在链状的断续未熔合的几率很高,未熔合缺陷如图 3 所示。

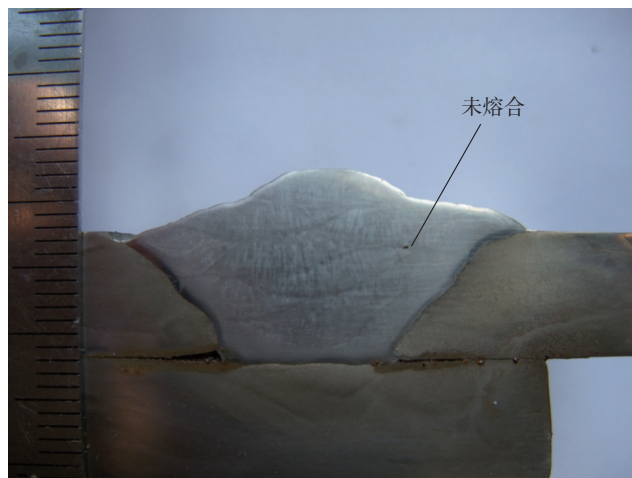


图3 镍合金多层堆焊中的未熔合缺陷  
Fig.3 Incomplete fusion flaw of nickel alloy multilayer surfacing welding

采用合理的焊道布置和道间距,控制热输入,以防过热,尽量采用小电流低速焊接,添加摆弧指令,控制层间温度,可改善未熔合的情况。

## 2.3 焊接试验方法

### 2.3.1 焊接方法

焊接方法为 MIG 自动堆焊。为了降低稀释率,采用小电流、小电压焊接,此时熔滴过渡形式为短路过渡。

### 2.3.2 焊道布置

多层多道焊中,布道方式设计直接影响到焊接质量。模拟件的布道方式设计要考虑到焊接位置、焊缝宽度、填充量、单层高度,设计多层焊的布道方式如图 4 所示。

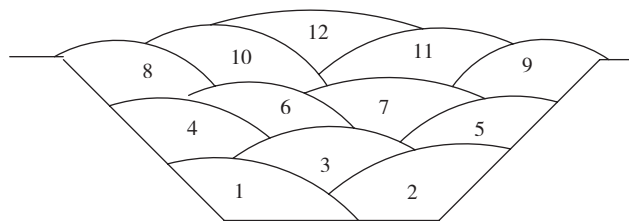


图4 多层堆焊布道方式  
Fig.4 Sermon way of multilayer surfacing welding

### 2.3.3 工艺参数优化

通过正交试验法,优化了焊接工艺参数,确定了排气阀堆焊最优焊接工艺参数:焊接电流 120~140A,电压 17.1~19.1V,焊接速度 0.18~0.22m/min,摆幅 3~4mm,梯形摆动频率 1.0~1.5Hz,干伸长 13~22mm,气体流量

10~20L/min。

### 3 质量验收检验

#### 3.1 外观检验

主要检验焊缝余高系数及焊缝成形系数。用 MIG 焊得到的焊道成形美观,焊缝宽度均匀一致,未出现咬边、焊瘤等缺陷,检验结果均为合格。

#### 3.2 金相检验

将样品横断面抛光,用硫酸铜盐酸溶液腐蚀后,在金相显微镜下观察焊缝及热影响区的组织。可以看出,主要组织为奥氏体。焊缝为细小的树枝状结晶,柱状晶粒沿着与母材垂直即散热最快的方向生长,在 2 种物质的交界面上,由于组织沿纵向呈柱状贯穿整个过渡区,因此堆焊层和焊缝有很好的冶金结合,这有利于提高堆焊层的结合强度。焊缝组织为镍基固溶体和碳化物的

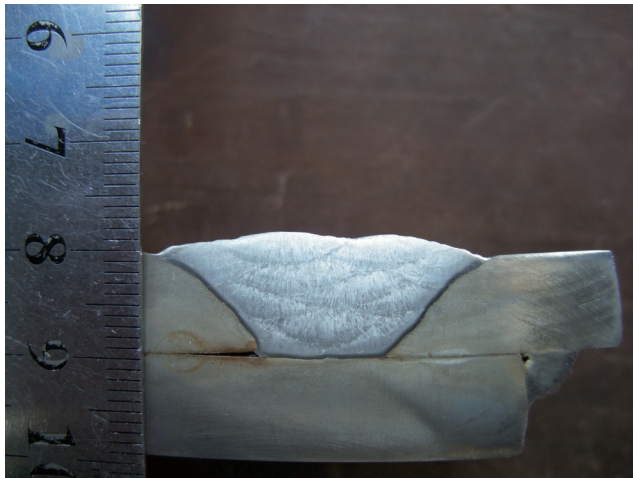


图5 焊缝断面金相

Fig.5 Weld cross section metallography

共晶体。熔合区的显微组织如图 5 所示。

#### 3.3 无损检验

(1) 渗透检测: 实验采用着色渗透探伤技术,根据 ISO 3452, 镍铬铁合金的最终加工表面必须通过液体渗透检测检查表面缺陷。经检验,表面无开口性缺陷,质量合格。

(2) 超声波检测: 在镍铬铁合金和母材之间以及镍铬铁合金之间的合金层必须通过超声波检测来融合缺陷。在焊后及机加工后,但在轧制前必须进行超声波检测。经 100% 超声检验,缺陷小于 0.06mm,完全符合排气阀质量检测标准,质量合格。

#### 3.4 硬度试验

分别测量了焊接母材、焊缝区及热影响区的维氏硬度。在堆焊层维氏硬度较高,达到 2548MPa; 从熔合线到基体,硬度迅速下降,基体硬度为 2254MPa。堆焊层

硬度的提高,可以显著提高材料的耐磨性能,能够适应对耐磨性要求较高的工作环境。

### 4 结论

通过上述焊接试验及质量验收检验,可得出以下结论。

(1) 由机器人本体、控制柜、焊机、两轴变位机、送丝机组成的机器人柔性焊接系统工作稳定、焊接精确,适应大功率柴油机排气阀高质量焊接的要求。

(2) 通过正交试验法,确定了排气阀堆焊最优焊接工艺参数,焊接电流为 120~140A,电压为 17.1~19.1V,焊接速度为 0.18~0.22m/min,摆幅为 3~4mm,梯形摆动频率为 1.0~1.5Hz,干伸长为 13~22mm,气体流量为 10~20L/min。

(3) 排气阀表面堆焊镍合金出现气孔、未熔合是因为焊接工艺选择不当造成焊接电弧不稳定、熔滴过渡不能有效控制所造成的。可以通过对工件进行预热,调整焊接工艺参数,控制熔滴过渡方式等方法来消除这些缺陷。

(4) 采用外观检测、金相检验、无损检验、硬度检验对焊接后的排气阀进行质量评定。不存在超过 0.06mm 的缺陷,完全符合阀盘质量检测标准,属于合格产品,完成了国内首个高质量镍基堆焊阀盘的焊接。

### 参考文献

- [1] Sugitani Y J. The technical trends and the future prospective of the shipbuilding industries in Japan. *Welding in the World*, 2004, 48: 173-184.
- [2] Sattar T P, Alaoui M, Chen S. Amagnetically adhering wall climbing robot to perform continuous welding of long seams and nondestructively test the welds on the hull of a container ship. *Hong Kong, China: 8th IEEE Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice*, 2001. 408-414.
- [3] 严铿. 焊接机器人在船舶中的应用. *江苏船舶*, 2009, 26(3): 42-44.
- [4] 杨金. 机器人在汽车车身制造中的应用. *航空制造技术*, 2004(3): 36-37.
- [5] 林尚扬. 我国焊接生产现状与焊接技术的发展. *船舶工程*, 2005, 27(增刊): 15-24.
- [6] 曲道奎. 工业机器人在汽车焊接中的应用. *航空制造技术*, 2004, (3): 40-41.
- [7] 章正. 船舶大型结构件机器人焊接关键技术研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2009.
- [8] 林砺宗. 阀体密封面镍基堆焊工艺. *焊接*, 2006(4): 29-32.
- [9] 吴桂涛, 魏海军. 船用柴油机排气阀的断裂失效分析. *金属热处理*, 2007, 32(4): 86-88.
- [10] 吾凯. 离子喷焊在排气阀修复上的应用. *机电工程技术*, 2001(4): 39-40.

(责编 深蓝)