

# 前混合磨料射流船舶除锈装置设计

杨淑珍<sup>1,2</sup>, 郭 青<sup>2</sup>

(1. 上海第二工业大学智能制造与控制工程学院, 上海 201209;

2. 上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200072)

**摘 要:** 船舶除锈能够对钢材表面进行良好的预处理, 是船舶涂装工艺的第一步, 使船舶表面涂层达到预期的保护效果。通过对几种船舶除锈方法优缺点的比较, 得出高压磨料射流是船舶除锈的主流。在分析前混合高压磨料射流船舶除锈工作原理和优势的基础上, 研究了基于 PLC 和触摸屏控制的前混合磨料射流船舶除锈装置的设计, 包括装置的组成、工作过程以及自动控制系统设计。最后通过正交实验, 研究确定了该装置工作所需的各影响因素的主次关系以及合适的参数组合并进行了实际验证。

**关键词:** 船舶除锈; 磨料射流; 前混合; 自动控制; 正交实验

**中图分类号:** TP 273

**文献标志码:** A

## 0 引言

随着中国经济的腾飞以及世界经济格局的变化, 世界造船、修船的中心逐渐东移, 使得我国的修造船业有了很大的发展空间。船舶除锈在造船、修船中处于关键地位, 修造船业快速发展的同时, 势必会带动船舶除锈技术的发展, 对其效果要求也会越来越高<sup>[1]</sup>。

用于船舶除锈的方法有多种, 比如手工除锈、化学除锈和机械除锈, 这些除锈方法各自有不同的优缺点<sup>[2]</sup>。其中, 手工除锈劳动强度大且效率低下, 现主要用于如修补局部缺陷等作业困难区域。化学除锈是利用酸与船舶钢板表面的金属氧化物发生化学反应去除表面锈层, 除锈过程有一定的危险性, 反应后的化学物质还会造成严重的环境污染, 与倡导的绿色发展相悖, 在船舶除锈中应用得越来越少。机械除锈是目前国内外主流的船舶除锈方式, 主要有干喷砂除锈、高压水射流除锈和磨料射流除锈。干喷砂除锈是依靠颗粒喷射的冲蚀作用处理船舶外层表面, 使其达到清洁度和粗糙度的要求, 除锈质量好且机械化程度高, 但喷射出的磨料一般不能回收, 还会因为高速的冲击作用变成粉尘状悬浮在空气

中, 环境污染较重。高压水射流除锈是利用超高压的加速水流打击在船舶表面, 破坏锈层和船舶表面间的黏附力, 使锈层脱落。高压水射流除锈无粉尘污染, 绿色环保, 目前发达国家主要采用该法进行除锈。但是这种纯水射流除锈系统要达到船舶除锈要求的效果和效率所需的压力很高, 相应地对设备要求也高, 且增大了除锈的危险性, 而且工作时易产生尖锐的啸叫、噪声较大<sup>[3-4]</sup>。故考虑在纯水射流中添加一些有磨削作用的固体颗粒, 形成磨料射流, 实现在相对较低压力下取得较好除锈效果。

磨料射流是 20 世纪 80 年代迅速发展起来的一种新型射流, 其除锈效率高且无污染, 符合绿色发展的要求, 与高压纯水射流相比, 对设备的要求也不高, 所以被广泛关注<sup>[5]</sup>, 相关学者也展开了一定的研究。例如张东速等<sup>[6]</sup>利用浆体输送灌装方法和淹没式筛分装置解决了缩短装料时间和回收复用磨料的问题; 曹琨等<sup>[7]</sup>提出磨料射流清洗装备利用高压软管解决了压力损失及使用方便的问题。磨料射流除锈技术虽被广泛关注, 但设备自动化程度普遍不高。实现对磨料射流除锈装置的自动控制, 实时监测工作压力、流量等重要参数, 是该新型射流除锈技术发展的必然要求。此外, 船舶除锈的锈蚀程度较严

收稿日期: 2017-08-21

通信作者: 杨淑珍 (1978-), 女, 江西玉山人, 副教授, 博士在读, 主要研究方向为机电测控技术、磨料流加工技术。

E-mail: szyang@sspu.edu.cn。

基金项目: 上海市科委科技攻关项目 (17511107302), 上海第二工业大学校重点学科项目 (XXKZD1603) 资助

重、除锈面积大,这就要求除锈装置需要通过选用合适的工艺参数组合在获得较好的除锈能力同时达到较高的除锈效率。查阅相关文献,目前针对船舶除锈的磨料射流装置合适的除锈工作参数研究得较少。成鹏飞等<sup>[8]</sup>对合金盘条高压磨料水射流除鳞系统进行了优化,得到了压力、靶距、移动速度等参数与除净率之间的关系,但未得到各影响因素的主次关系,而且由于合金条的除锈面积小、锈蚀程度低,故其得到的最佳参数组合对船舶除锈不太适用;同样,沈忠厚等<sup>[9]</sup>对磨料射流清洗油管涂料进行了实验研究,得出了喷嘴直径、靶距、喷射角度和磨料直径与清洗效率之间的关系,但未研究压力和喷嘴移动速度与清洗效率之间的关系,而这2个因素正是研究船舶除锈效率所必须的。为此,本文提出了一种基于PLC和触摸屏控制的前混合磨料射流船舶除锈装置,并通过正交实验研究了该装置工作所需的各影响因素的主次关系以及合适的参数组合,经实验验证,效果较好。

## 1 前混合磨料射流船舶除锈工作原理

磨料射流是一种在高压水中混入一定的磨料颗粒形成的混合射流,磨料颗粒带着高压水的动能,不断地对船体表面进行高频率的冲击和磨削作用,射流品质和工作效率都很高。

磨料射流分为前混合和后混合磨料射流,两者的区别是磨料与水的混合点不同。前混合磨料射流是指先将磨料与水在磨料罐中混合,通过管路加速后,将磨料送至喷嘴进行船舶除锈作业(见图1),其磨料与水的混合点在水喷嘴之前。后混合磨料射流是依靠喷嘴射出高压水射流时形成的虹吸作用,将磨料罐内的干磨料吸入管道内与水混合,再通过细小的喷嘴形成高速磨料射流(见图2)<sup>[10]</sup>,其磨料与水的混合点在水喷嘴之后。

后混合磨料射流系统简单,加料方式简单、方便,比较容易实现,管路的稳定性也较高;但磨料粒子很难进入射流中心区域,不能有效地吸收高压水的能量,所以所需的射流压力较高,也会造成瞬时磨料供给不确定性的现象。前混合磨料射流工作压力较低、磨粒获得的动能大、效率高,磨粒进入管路中静压水流的内部比较容易,能够形成混合均匀的磨料射流束,但系统复杂程度较高,管壁承受高压水流作用的同时,还要受到磨料粒子的摩擦和挤压作用,

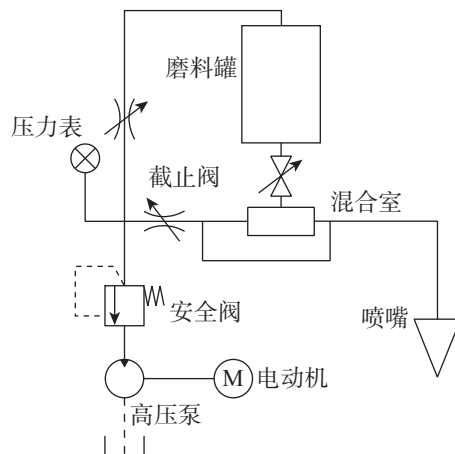


图1 前混合磨料射流的系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of pre-mixed abrasive jet

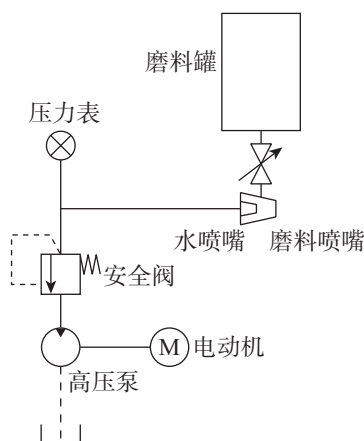


图2 后混合磨料射流的系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of post-mixed abrasive jet

所以管路和喷嘴处易发生磨损和堵塞<sup>[11-12]</sup>。表1所示为两种混合方式的特点的对比情况,可以看出,前混合磨料射流优于后混合磨料射流,所以本船舶除锈设备选择前混合的混合方式。

表1 两种磨料射流的特点对比表

Tab. 1 Comparative table of characteristics of two kinds of abrasive jet

|            | 前混合磨料射流 | 后混合磨料射流 |
|------------|---------|---------|
| 系统复杂程度     | 复杂      | 简单      |
| 磨料与水混合情况   | 均匀      | 不均匀     |
| 管路稳定性      | 不高      | 高       |
| 管路磨损程度     | 高       | 低       |
| 系统所需压力/MPa | 5~10    | 50~100  |
| 系统堵塞频率     | 高       | 低       |
| 除锈效率       | 高       | 低       |
| 成本         | 低       | 高       |

另外,磨料水射流的磨料主要是起磨削作用的颗粒状材料,可以是山砂、河沙、石英砂、棕刚玉、

铁屑、钢砂等, 综合考虑硬度、强度、韧性、塑性和成本等因素, 并在能达到船舶除锈效果和效率的前提下<sup>[13]</sup>, 本船舶除锈装置采用不会引起船坞所在河道环境污染的河沙作为磨料颗粒。

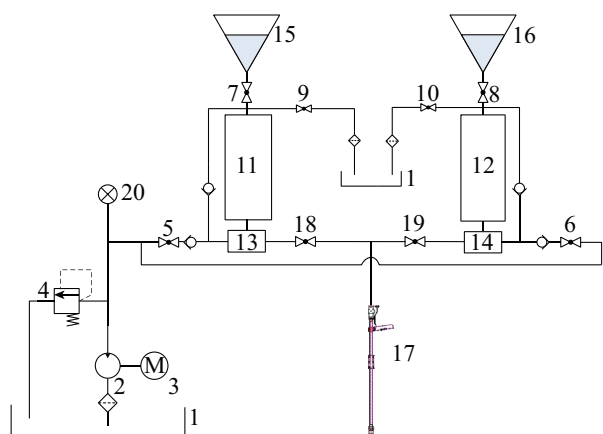
## 2 前混合磨料射流船舶除锈装置设计

### 2.1 装置组成和工作过程

本船舶除锈装置主要由动力系统、磨料供给系统、喷射装置以及电气控制系统组成。

动力系统包括驱动电动机、柱塞水泵以及缓冲水箱等, 主要为装置提供工作所需的压力; 磨料供给系统包括设备自带的料斗、阀门、砂罐以及输送管路等, 采用直接供料方式为装置提供所需的磨料; 喷射装置由进水阀、混合腔、出料阀、喷枪以及连接管路组成。进水阀打开后在工作压力作用下磨料和水经由混合腔混合后通过磨料阀从喷枪中喷出进行除锈; 电气控制系统包括控制器、按照一定逻辑动作的所有电动或气动元件以及进行压力、液位等状态监控所需的传感器, 对装置的工作过程进行自动控制。

装置的工作原理如图3所示。



1—水箱; 2—柱塞泵; 3—电动机; 4—溢流阀; 5、6—进水阀; 7、8—加料阀; 9、10—加料溢水阀; 11、12—料罐; 13、14—混合腔; 15、16—加料料斗; 17—喷枪; 18、19—出料阀; 20—压力表

图3 前混合磨料射流船舶除锈系统原理图

Fig. 3 Schematic diagram of ship rust removal system of pre mixed abrasive waterjet

为保证系统的连续供料, 采用双储料罐的交替工作方式。具体工作过程是: 系统上电后, 按下喷枪17上的“启动除锈”按钮, 则启动柱塞泵电动机3进行系统升压, 电动机采用变频器控制转速以调节

泵的流量进而调节系统压力, 当系统压力达到工作压力时, 打开进水阀5和出料阀18即可进行船舶除锈作业。

当料罐11内磨料用完时, 关闭进水阀5和出料阀18, 打开进水阀6和出料阀19, 使用料罐12内磨料进行除锈; 同时打开加料阀7和加料溢水阀9, 向料罐11加料。当料罐12内磨料用完时, 关闭进水阀6和出料阀19, 打开进水阀5和出料阀18, 使用料罐11内磨料进行除锈; 同时打开加料阀8和加料溢水阀10, 向料罐12加料, 如此循环进行下去。图4所示为系统的自动工作流程图。

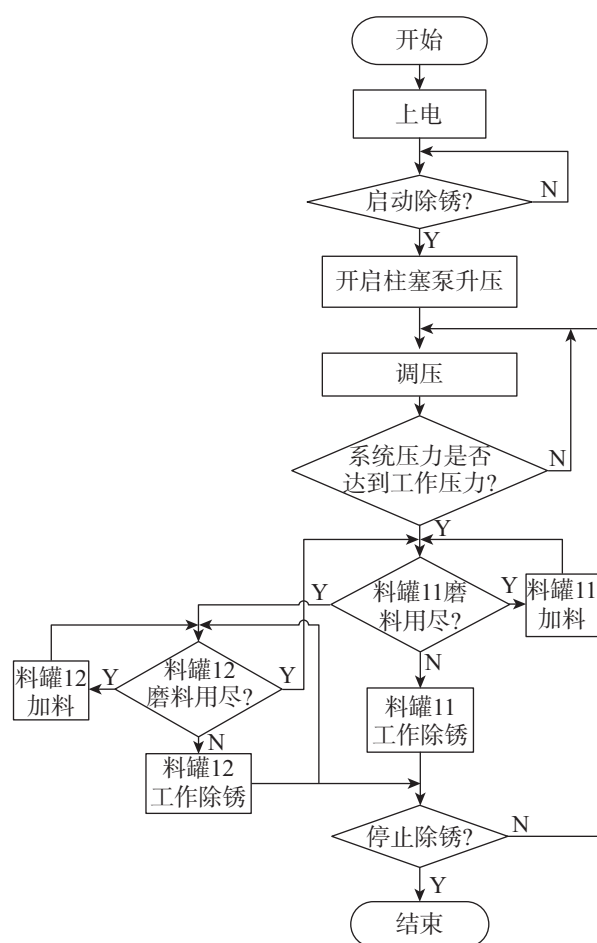


图4 系统工作流程图

Fig. 4 Flow chart of automatic processing

### 2.2 自动控制系统设计

自动控制系统的基本组成如图5所示, 包括PLC、触摸屏、外部信号输入部分和输出部分。

选取西门子S7-200 PLC作为控制系统的控制中心, 与触摸屏配合使用。通过PLC实现升压、调压、换罐、加料、除锈等过程的自动控制以及压力、物位等状态数据的采集。通过触摸屏, 实现参数设置

和状态显示等人机交互功能。图 6 所示为设计的船舶除锈装置自动控制人机界面,能够直观地显示和监测整个系统的运行状态以及各元件的工作状态。

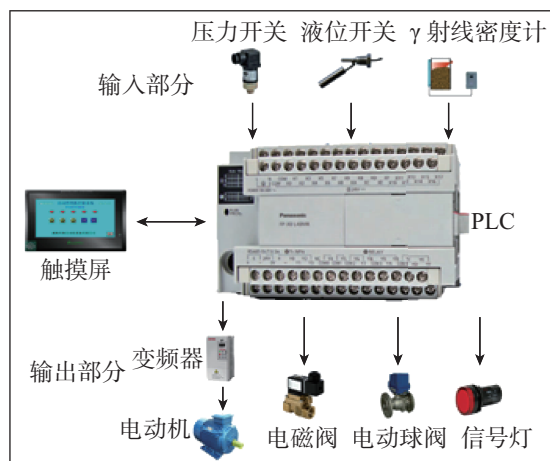


图 5 控制系统组成

Fig. 5 Components of the control system

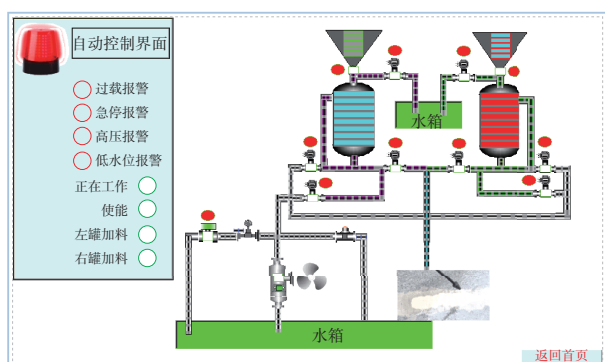


图 6 触摸屏自动控制界面

Fig. 6 Touch screen automatic control interface

外部信号的输入部分包括压力开关、液位开关、监测砂罐内磨料含量的  $\gamma$  射线密度计以及急停信号和报警信号等;输出控制部分包括电动机、电磁阀、电动球阀、控制电机转速的变频器、信号灯以及中间继电器等。

### 3 加工参数确定

选择合适的加工参数并以其进行作业是装置能够高效除锈的关键。

影响除锈过程的因素很多,比如压力、流量、磨料、喷嘴、喷射角度、喷射靶距、喷射速度等,除锈效果是受这些因素共同作用的结果,如果对每个影响因素都全面展开单因素实验,势必导致实验规模庞大,实验效率较低。为了能准确、有效地获得合适的加工参数,本文基于自主开发的样机(见图 7)采

用正交实验法对加工参数进行研究。正交实验法是一种安排多因素实验以便得到最优水平组合的方式,能够在大幅度地减少实验次数的同时保证实验的可行性<sup>[14-15]</sup>。



图 7 船舶自动除锈装置样机

Fig. 7 Prototype of automatic ship rust removal equipment

### 3.1 实验设计

影响除锈效果的因素较多,在大量实验研究的基础上,笔者认为工作压力、磨料粒径、靶距、喷枪移动速度、喷射角度是最主要的影响因素。其中,喷射角度与其他几个因素之间的耦合作用较小,通过查阅相关的文献资料,加之单因素实验的验证,发现喷射角度即喷射射流与锈蚀钢板形成的角度为  $60^\circ$  时除锈效果最佳<sup>[16]</sup>,所以本实验取喷射角度固定为  $60^\circ$ 。因此,本文最终选择工作压力、靶距、喷枪移动速度和磨料粒径作为影响因素进行正交实验分析。

喷射的除锈效果一般用 Sa 表示, Sa 分为 Sa1、Sa2、Sa2.5、Sa3 4 个等级,为了对除锈效果进行量化,将这 4 个等级分别对应到不同的分数,如表 2 所示,除锈效果根据不同等级的评价标准给出相应的分数。

本次实验采用 4 因素 4 水平的正交实验方案。正交实验参数水平设计如表 3 所示,根据初步实验,当工作压力超过 7 MPa 时除锈效果较好,但若压力过大,喷枪的后坐力也会快速增大,持枪者很难把握,因此本实验初定工作压力在 7~10 MPa;靶距初定在 300 mm 以上;喷枪移动速度过小时,虽能更好地除去锈斑,但除锈效率不高,在保证一定除锈效率的前提下,暂定喷枪移动速度在 400 mm/min 以上<sup>[17]</sup>。

表 2 除锈效果评判标准

| Tab. 2 Evaluation standard of derusting effect |       |    |                                              |
|------------------------------------------------|-------|----|----------------------------------------------|
| 序号                                             | 等级    | 评分 | 评价标准                                         |
| 1                                              | Sa1   | 1  | 钢板表面没有可见的油脂、污物及不牢的附着物                        |
| 2                                              | Sa2   | 3  | 钢板表面没有可见的油脂、污垢, 基本清除氧化皮、铁锈等附着物, 有牢固的附着物残留    |
| 3                                              | Sa2.5 | 4  | 钢板表面没有可见的油脂、污垢以及氧化皮、铁锈和油漆等附着物, 仅残留轻微的点状或条状色斑 |
| 4                                              | Sa3   | 5  | 钢板表面没有可见的油脂、污垢、氧化皮、铁锈和油漆等附着物, 泛着均匀的金属光泽      |

表 3 正交实验参数水平表

| Tab. 3 Parameter level of orthogonal test |                  |                 |                              |           |
|-------------------------------------------|------------------|-----------------|------------------------------|-----------|
| 水平                                        | 实验因素             |                 |                              |           |
|                                           | 工作压力             | 靶距              | 喷枪移动速度                       | 磨料粒径 $D/$ |
|                                           | $p_A/\text{MPa}$ | $l_B/\text{mm}$ | $v_C/(\text{mm}/\text{min})$ | 目数        |
| 1                                         | 7                | 300             | 400                          | 18        |
| 2                                         | 8                | 350             | 500                          | 20        |
| 3                                         | 9                | 400             | 600                          | 24        |
| 4                                         | 10               | 450             | 700                          | 28        |

3.2 实验分析

根据正交实验因素水平表进行了相关实验, 实验结果如表 4 所示。

选择极差分析法分析本次正交实验, 其优势在于过程简单、容易理解, 分析的结果也较为可靠。先计算出正交表中各列的极差  $R$  值, 再根据  $R$  的大小来判断本次实验影响因素的主次关系, 同时找到最佳的参数组合。

从图 8 可以很直观地看出, 随着压力的变大, 曲线呈大幅度上升趋势, 除锈效果越好; 随着靶距的增加, 曲线先上升再下降, 存在拐点, 但整体很平缓, 对除锈的效果影响不大; 随着喷枪移动速度的增加, 曲线呈下降趋势, 除锈效果越差。目数越大, 表示颗粒越细, 可以看出, 随着目数的增加, 及随着磨料粒径的减小, 曲线先上升再下降, 存在拐点, 目数为 20 (粒径为  $830\text{ }\mu\text{m}$ ) 时, 除锈效果最好。

表 4 正交实验极差分析表

| Tab. 4 Range analysis of orthogonal test |                   |       |       |       |      |
|------------------------------------------|-------------------|-------|-------|-------|------|
| 实验序号                                     | $A$               | $B$   | $C$   | $D$   | 除锈效果 |
| 1                                        | 1                 | 1     | 1     | 1     | 3.84 |
| 2                                        | 1                 | 2     | 2     | 2     | 4.01 |
| 3                                        | 1                 | 3     | 3     | 3     | 3.75 |
| 4                                        | 1                 | 4     | 4     | 4     | 3.68 |
| 5                                        | 2                 | 1     | 2     | 3     | 4.12 |
| 6                                        | 2                 | 2     | 1     | 4     | 4.18 |
| 7                                        | 2                 | 3     | 4     | 1     | 3.95 |
| 8                                        | 2                 | 4     | 3     | 2     | 4.21 |
| 9                                        | 3                 | 1     | 3     | 4     | 4.19 |
| 10                                       | 3                 | 2     | 4     | 3     | 4.22 |
| 11                                       | 3                 | 3     | 1     | 2     | 4.62 |
| 12                                       | 3                 | 4     | 2     | 1     | 4.32 |
| 13                                       | 4                 | 1     | 4     | 2     | 4.69 |
| 14                                       | 4                 | 2     | 3     | 1     | 4.47 |
| 15                                       | 4                 | 3     | 2     | 4     | 4.34 |
| 16                                       | 4                 | 4     | 1     | 3     | 4.41 |
| K1                                       | 3.82              | 4.21  | 4.26  | 4.15  |      |
| K2                                       | 4.12              | 4.22  | 4.20  | 4.38  |      |
| K3                                       | 4.34              | 4.17  | 4.16  | 4.13  |      |
| K4                                       | 4.48              | 4.16  | 4.14  | 4.10  |      |
| 极差 $R$                                   | 0.66              | 0.06  | 0.12  | 0.28  |      |
| 优水平                                      | $A_4$             | $B_2$ | $C_1$ | $D_2$ |      |
| 主次关系                                     | $ADCB$            |       |       |       |      |
| 最优组合                                     | $A_4 B_2 C_1 D_2$ |       |       |       |      |

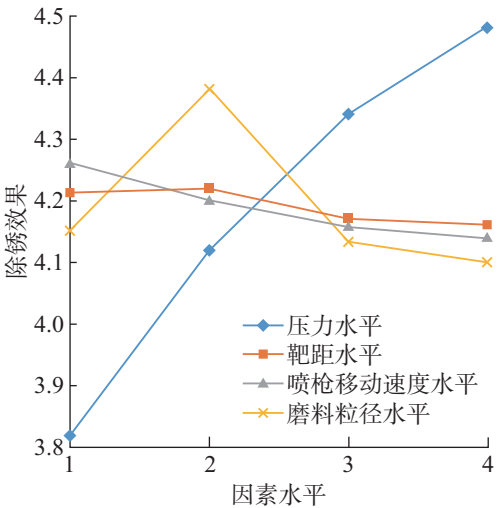


图 8 除锈效果的极差图

Fig. 8 Range diagram of rust removal effect

根据曲线的陡峭及平缓程度,分析得出:压力水平(A)对实验结果的影响最大,磨料粒径水平次之(D),接着是喷枪移动速度水平(C),靶距水平(B)最小。各因素对实验结果的影响顺序是:

$$A > D > C > B$$

且参数组合为  $A_4 B_2 C_1 D_2$  时,除锈效果最好。

## 4 结果验证

取一与船舶锈蚀程度相当的钢板,如图 9(a)所示,钢板尺寸为  $1\text{ m} \times 0.95\text{ m}$ ,表面全部锈蚀、附着较牢、并已发生较多点蚀。在实验样机上采用第 3 节分析的最优参数进行除锈实验:取 20 目的河沙作为磨料,在  $10\text{ MPa}$  压力下,由工人手持喷枪以  $60^\circ$  喷射角度、 $350\text{ mm}$  靶距、约  $400\text{ mm/min}$  的移动速度进行除锈。经  $285\text{ s}$  后,钢板上的锈蚀全部清除,效果如图 9(b)所示,钢板表面没有可见的油脂、污垢以及氧化皮、铁锈和油漆等附着物,仅残留轻微的点状或条状色斑。由此可见,本文设计的装置采用无附加环境污染的河沙作为磨料的情况下,除锈效果可达 Sa2.5、除锈效率可达  $12\text{ m}^2/\text{h}$ ,能较好地满足大型远洋船舶除锈的要求。

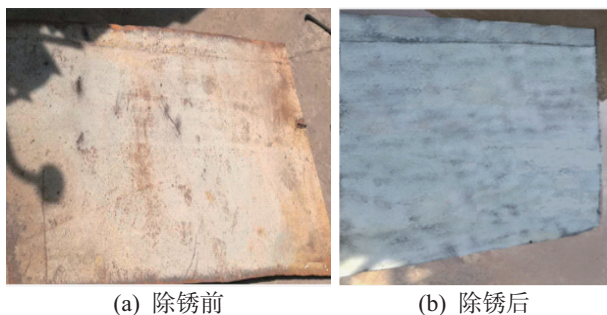


图 9 除锈效果对比  
Fig. 9 Comparison of rust removal effect

## 5 结 语

利用 PLC 和触摸屏设计的前混合磨料射流船舶除锈装置,选用无附加环境污染的河沙作为磨料,采用双料罐,实现了对系统升压、加料和喷射除锈的连续作业的自动控制以及对工作压力、流量、料罐中磨料使用情况等状态参数的实时动态监测。在通过正交实验得到的加工参数下的除锈效果能达到 Sa2.5 以上。应用表明,该装置自动化程度高、可靠

性好、人机界面友好、易于操作、所需的压力小、噪声小、安全性高、效率高、环境污染小,能够很好地满足船舶除锈的工业化生产要求。

## 参考文献:

- [1] 王兴如,衣正尧,弓永军,等.船舶除锈技术的研究与发展综述[J].中国水运,2008,8(11):13-15.
- [2] 陈玄.基于磨料水射流技术的除锈实验研究[D].四川:西华大学,2016.
- [3] 古曦.车载式超高压水射流船舶除锈系统集成及控制[D].辽宁:大连海事大学,2012.
- [4] XU Z L, MA A C, DONG X. Critical velocity of ultra-fine comminuting coal with DIA-jet[J]. Journal of Heilongjiang Institute of Science & Technology, 2007, 17(1): 22-25.
- [5] 杨刚.磨料水射流除锈技术仿真研究[J].机电工程,2013,30(8):929-932.
- [6] 张东速,贾北华,刘本立.前混合磨料射流除锈成套设备的研究[J].矿山机械,1999(10):53-54.
- [7] 曹琨,张庆财,徐竹林,等.磨料水射流技术在钢结构表面清洗中的应用[J].清洗世界,2009,25(6):8-11.
- [8] 成鹏飞,周向红,唐勇.合金盘条高压磨料水射流除鳞系统实验研究[J].表面技术,2016,45(4):144-148.
- [9] 沈忠厚,王开龙,汪志明,等.射流清洗油管涂层的实验研究[J].中国安全科学学报,1995(s1):88-92.
- [10] 宁原林,胡寿根.磨料射流的研究进展[J].润滑与密封,2002(1):79-81.
- [11] 史亮,王强,赵辉.水射流切割设备中磨料混合方式的比较[J].机械研究与应用,2007,20(5):88-89.
- [12] 孙赫应.超高压水射流交通标志线清洗系统研究[D].辽宁:大连海事大学,2013.
- [13] LIU H, WANG J, KELSON N, et al. A study of abrasive waterjet characteristics by CFD simulation[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, s153/154(1): 488-493.
- [14] 王高华.基于前混合磨料射流技术清除道路标线的参数研究[D].安徽:安徽理工大学,2015.
- [15] NGYEN T, SHANMUGAM D K, WANG J. Effect of liquid properties on the stability of an abrasive water jet[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2008, 48(10): 1138-1147.
- [16] 张丽丽.旋转磨料射流除锈实验研究[J].清洗世界,2013,29(11):16-21.
- [17] 王圣磊.前混合式磨料射流清洗试验及系统参数匹配研究[D].山东:中国石油大学(华东),2009.

## Study of Ship Rust Removal Equipment Based on Premixed Abrasive Jet

YANG Shuzhen<sup>1,2</sup>, GUO Qing<sup>2</sup>

(1. School of Intelligent Manufacturing and Control Engineering, Shanghai Polytechnic University, Shanghai 201209, China; 2. School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** Ship rust removal can be a good surface pretreatment for steel, and it is the first step of ship painting process so as to achieve the desired protective effect of ship surface coating. By comparing the advantages and disadvantages of several rust removal methods, it was concluded that high pressure abrasive jet was the mainstream of ship rust removal in the future. On the basis of analyzing the working principle and advantage of high pressure abrasive jet ship rust removal, the system of ship rust removal based on PLC controlled combined with HMI was studied including its composition, working process and the automatic control system. Finally, the relationship between the primary and secondary factors of the control system and the optimum parameters were determined by the orthogonal test to make the equipment work more effectively.

**Keywords:** ship rust removal; abrasive jet; premixed; automatic control; orthogonal test