

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.01.009

船舶工业超高压除锈用水水质保障技术研究

牛江月¹, 魏忠庆², 闫怀北³, 孙东晓⁴, 马丽清¹, 范世东³,
李伟英^{1,5}

(1. 同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 福州市自来水有限公司, 福建福州 350001; 3. 舟山中远海运重工有限公司, 浙江 舟山 316131; 4. 中铁上海工程局集团市政环保工程有限公司, 上海 201906; 5. 同济大学 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 超高压水除锈是当前广泛使用的船舶外板除锈技术,具有低碳环保的优点。但是由于水质问题,实际运行中超高压水除锈设备普遍存在磨损、腐蚀及结垢的情况,影响生产效率和生产成本。以浙江舟山某船舶修造企业为例,通过对超高压水除锈系统生产水质的检测与分析,发现浊度和颗粒物含量超标是该系统突出的水质问题。基于此,提出微絮凝-超滤联用水质保障技术,小试结果表明,该工艺对浊度、颗粒物的去除率分别可达到98.0%、99.5%,能够显著提升水质,并可降低生产成本,满足超高压水除锈提质增效的要求。

关键词: 超高压水除锈; 水质保障; 微絮凝过滤; 超滤; 船舶工业

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)01-0053-05

Research on Water Quality Assurance Technology for Ultra-high Pressure Water Rust Removal in Shipbuilding Industry

NIU Jiangyue¹, WEI Zhongqing², YAN Huabei³, SUN Dongxiao⁴, MA Liqing¹,
FAN Shidong³, LI Weiying^{1,5}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Fuzhou Water Supply Co. Ltd., Fuzhou 350001, China; 3. COSCO Shipping Heavy Industry <Zhoushan> Co. Ltd., Zhoushan 316131, China; 4. Municipal Environmental Protection Engineering Co. Ltd. of CREC Shanghai Group, Shanghai 201906, China; 5. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Ultra-high pressure (UHP) water rust removal is a widely used technology for cleaning ship hulls, offering advantages such as low-carbon and environmentally friendly. However, due to water quality issues, UHP water rust removal equipment often suffers from wear, corrosion, and scaling during actual operation, affecting production efficiency and costs. Taking a shipbuilding and repair enterprise in Zhoushan City, Zhejiang Province as an example, testing and analysis of the production water quality in

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52470012); 船舶高压水除锈用水水质提升研究项目(kh0040220250253); 福州市高品质饮用水工程技术咨询服务项目(kh0040020211986)

通信作者: 李伟英 E-mail: 123lwyktz@tongji.edu.cn

the UHP water rust removal system revealed that excessive turbidity and particulate content were prominent water quality issues in this system. Based on this, a water quality assurance technology combining micro-flocculation and ultrafiltration was proposed. Experiments demonstrated that this process could achieve removal rates of 98.0% for turbidity and 99.5% for particulates, significantly improving water quality, reducing production costs, and meeting the requirements for enhancing efficiency and quality in UHP water rust removal.

Keywords: ultra-high pressure water rust removal; water quality assurance; micro-flocculation filtration; ultrafiltration; shipbuilding industry

船体除锈是船舶修造不可缺少的环节,传统的喷砂除锈技术会产生大量的粉尘污染,影响环境安全及相关从业人员健康,为此,各船企积极研发超高压水除锈工艺。水质是影响超高压水除锈系统安全、高效、持续运行的重要因素。研究表明,无法被进水处理设施完全去除的小粒径悬浮颗粒物会直接进入超高压水除锈系统,对超高压增压设备及配件造成冲蚀磨损,降低水泵柱塞的运动精度^[1],影响射流喷嘴的流场均匀性和射流稳定性^[2],且磨损程度与颗粒污染物粒径^[3]、硬度^[4]、浓度^[5]等因素相关。无机离子则是决定除锈系统水质腐蚀和结垢特性的关键指标^[6],超高压射流除锈用水经水泵机组加压后的温度能达到60℃以上,在该条件下钙、镁等硬度离子更易析出并在设备内壁形成水垢^[7],增加射流阻力。多孔的水垢沉积物亦可促进氯离子聚集,加剧破坏金属表面的钝化膜,造成设备零件腐蚀^[8-9],缩短其寿命。根据《超高压水射流船舶除锈成套装备》(GB/T 43142—2023)对设备易损件生产可靠性的规定,其生产用水水质应达到我国现行《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2022)的要求,超高压增压设备制造企业在也会对设备的进水水质指标(如温度、pH、悬浮颗粒物含量、无机离子浓

度等)进行规定,以保证其长期稳定运行。然而,实际生产中仍存在诸多水质问题影响着超高压水除锈生产的成本和效率,且鲜见具有针对性的水质保障技术研究报道。

浙江舟山某船舶修造企业自2017年起开展除锈技术改革,目前已实现超高压水除锈作业全覆盖,生产年用水量超过 $100 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。但在实际运行中,除锈系统存在进水水质不稳定、水中杂质较多、超高压设备磨损及腐蚀严重、停工检修频繁等问题。为此,以该企业为例,开展超高压水除锈系统生产水质特性及水质保障技术研究,旨在实现超高压水除锈生产提质增效,并为船舶除锈生产绿色低碳发展提供理论依据及技术指导。

1 材料与方法

1.1 水处理工艺现状

浙江舟山某船舶修造企业(以下简称“船厂”)的生产规模为“三坞七泊位”,均采用超高压水除锈系统进行除锈生产,该系统的水源水为水库水(简称“原水1”)和经淡化处理的海水(简称“原水2”),分别引入船厂厂区,经由净水站(处理工艺:砂滤→活性炭→袋式过滤器)处理后供至超高压水除锈设备,生产供水流程如图1所示。

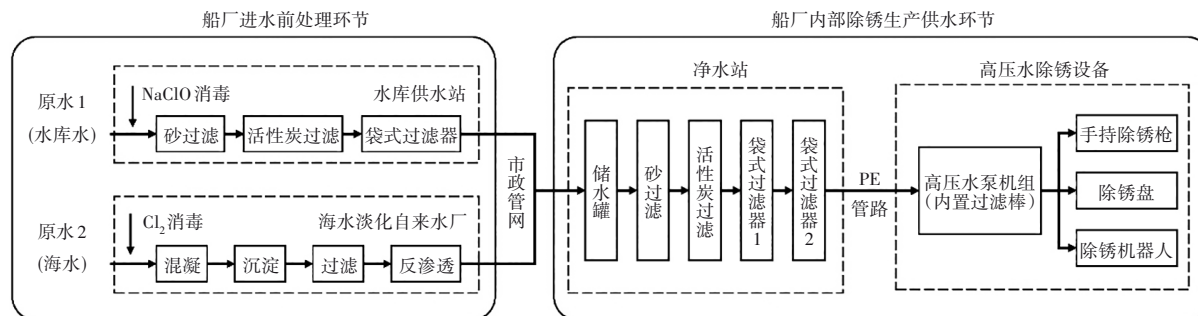


图1 厂区超高压水除锈生产供水流程

Fig.1 Water supply process for ultra-high pressure water rust removal

根据《超高压水射流船舶除锈成套装备》(GB/T 43142—2023)及高压水泵机组操作说明文件,船厂123台超高压水除锈水泵机组的进水水质应满足:pH=6.5~8.5、浊度 ≤ 1 NTU、过滤等级 $\leq 10 \mu\text{m}$ (黄河HH系列)、电导率 $\leq 1000 \mu\text{S}/\text{cm}$ 、总硬度=3~15德国硬度(1德国硬度=17.86 mg/L,以 CaCO_3 计)、总固体含量 ≤ 20 mg/L、氯化物含量 ≤ 100 mg/L。

1.2 水质检测与分析方法

在船厂净水站各工艺环节设置采样点(储水罐、砂滤出水、活性炭过滤出水、袋式过滤器出水),分别对原水1和原水2工况下的除锈生产用水进行采样,检测浊度和颗粒物的赋存情况(GR-1500A型激光颗粒计数仪)以及总硬度、pH、电导率、总固体含量等水质指标,评估生产用水水质是否符合超高压水除锈设备的要求,并计算水质化学稳定性参数,分析水质腐蚀及结垢的倾向。

Langelier 饱和指数 (LSI) 和 Ryznar 稳定指数 (RSI) 是常用的水质化学稳定性判别指数。其中, LSI 可判断水质结垢或腐蚀特征 (LSI <0 , 腐蚀; LSI=0, 稳定; LSI >0 , 结垢), RSI 则对 LSI 评价等级进行了补充 (4.5 $\leq$ RSI <5.0 , 严重结垢; 5.0 $\leq$ RSI <6.0 , 轻度结垢; 6.0 $\leq$ RSI <7.0 , 稳定; 7.0 $\leq$ RSI <7.5 , 轻度腐蚀; 7.5 $\leq$ RSI ≤ 9.0 , 严重腐蚀; RSI >9.0 , 极严重腐蚀)^[10]。

1.3 水处理小试

基于进水水质、超高压水除锈工艺要求及船厂用地条件,本研究采用微絮凝-超滤组合工艺进行水处理小试,以为净水站工艺改造提供技术参考。试验装置如图2所示,管式超滤膜滤芯(公称孔径为 $0.1 \mu\text{m}$,膜有效过滤面积为 0.01593 m^2 ,最大跨膜压差为 0.2 MPa)采用外压式终端过滤,运行通量为 $700 \text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 。

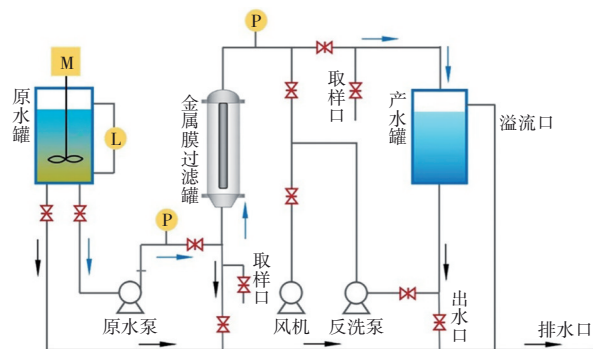


图2 小试装置

Fig.2 Experimental scale setup

2 结果与讨论

2.1 水质检测与分析结果

根据浊度、总固体含量的检测结果,虽然净水站各工艺环节对上述指标均有一定的去除效果,但原水1和原水2工况下船厂净水站出水浊度分别为5.0 NTU(肉眼可见水的浑浊)和3.2 NTU,远未达到《超高压水射流船舶除锈成套装备》(GB/T 43142—2023)的要求;出水总固体含量分别为226和228 mg/L,远超过高压水泵机组要求的最大值20 mg/L;出水中粒径 $>10 \mu\text{m}$ 的颗粒物浓度分别为34、49 CNT/mL。因此,现净水站处理工艺不能满足超高压水泵机组对生产用水水质的要求,且颗粒物含量超标是该船厂超高压水除锈过程中显著存在的水质问题。

另外,检测结果显示,净水站各工艺环节出水的总硬度、电导率指标变化不明显,表明当前工艺对无机离子的去除能力有限。虽然净水站活性炭过滤工艺的主要去除对象为有机物,但活性炭滤后出水的TOC、 UV_{254} 指标均无明显下降,在原水2工况下反而有所上升,说明现用活性炭滤罐的设计负荷和运行周期等不合理,不仅对水中有机物的去除效果不理想,而且存在吸附饱和后释放有机物的可能性。

虽然电导率、pH、总硬度指标满足水泵机组对水质的要求,但是实际生产中仍存在除锈枪及除锈盘喷嘴生锈、结垢的问题。水质化学稳定性分析结果表明,船厂超高压水除锈生产各环节用水的LSI指数均小于0,RSI指数均大于9.0,具有极严重腐蚀倾向。

基于水质检测与分析结果,当前超高压水除锈系统配套净水站处理工艺存在以下问题:①浊度和颗粒物去除效果不佳,且厂区管道和水处理设备存在二次污染,导致除锈用水中的相关污染物含量超标;②对无机离子的去除效果有限,生产用水具有极严重腐蚀倾向,可能导致设备部件腐蚀;③活性炭滤罐设计负荷和运行周期不合理,对有机物的去除效果不佳,甚至可能因活性炭吸附饱和而释放有机物。

需要指出的是,当前仅第1个问题未达到现行标准和设备操作说明的要求,因此后续试验将优先解决浊度和颗粒物超标问题,以确保水质达标。对

于无机离子和有机物的去除,由于缺乏明确的标准和操作指南,且无机离子的去除成本较高,这两个问题将作为后续提标改造的内容。

2.2 水处理小试结果分析

使用腐殖酸和高岭土配制试验原水,以浊度和颗粒物为主要去除对象,通过烧杯试验确定最佳混凝剂投加量,结果如图3所示。随着聚合氯化铝(PAC)投加量的增加,浊度迅速降低,当PAC投加量增至25 mg/L时,浊度去除率达到最高值93.5%;随着PAC投加量的继续增加,浊度去除率呈下降趋势。因此,PAC最佳投加量为25 mg/L。

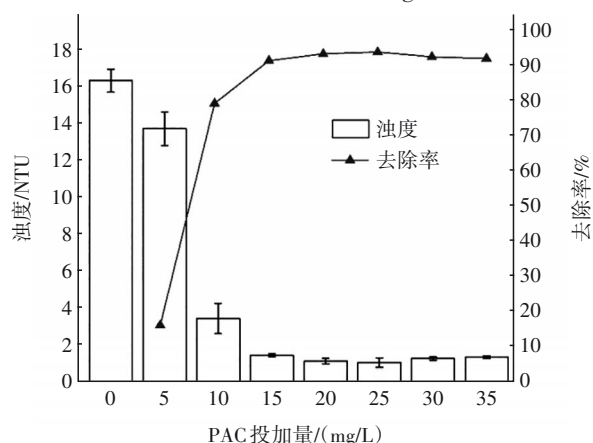


图3 混凝剂投加量对浊度去除效果的影响

Fig.3 Effect of coagulant dosage on turbidity removal efficiency

试验原水的平均浊度为(16.28±0.62) NTU,颗粒物总量为21 624 CNT/mL。当PAC投加量为25 mg/L时,微絮凝-超滤工艺出水浊度为(0.32±0.04) NTU、去除率达到98.0%,颗粒物总量为107 CNT/mL、去除率达到99.5%,可有效去除原水中的悬浮颗粒等污染物。另外,微絮凝-超滤工艺出水中粒径>10 μm的颗粒物含量仅为10 CNT/mL,处理效果优于船厂净水站现用工艺。

当进水浊度<30 NTU时,微絮凝技术可有效去除水中具有较强动力学稳定性和凝聚稳定性的胶体颗粒,并为后续的膜分离技术提供有效的预处理^[11-12]。微絮凝-超滤工艺对浊度及颗粒物的去除效果优于船厂净水站现用工艺,出水水质满足超高压水除锈生产要求。

2.3 成本分析

根据生产调研及成本核算结果,当前企业除锈生产总成本约为4 800万元/年,水质问题导致的涉

水配件维护及更换成本约为800万元/年,超高压水泵机组平均无故障工作时长仅19 h。各部分成本占比详见图4,其中固定资产折旧均采用直线计算法。

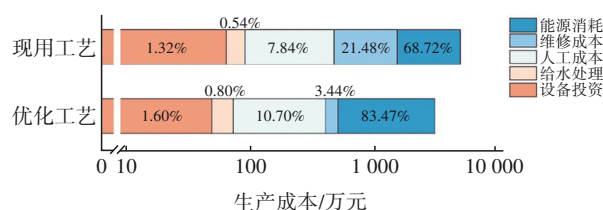


图4 水除锈工艺优化前后超高压水除锈生产成本对比

Fig.4 Comparison of production costs for ultra-high pressure water rust removal before and after water treatment process optimization

微絮凝-超滤工艺的水处理成本以5.0元/m³估算,工艺优化后水处理成本仅增加约4万元/年。涉水配件维护及更换成本根据优化后维修次数进行换算,总生产成本每年降低约800万元/年(包括人工成本),优化工艺可以满足超高压水除锈生产提质增效的要求。

3 结论与建议

① 实际生产中船舶超高压水除锈系统的水质问题主要有:浊度和颗粒物含量超标,去除率较低(配套净水站出水浊度达5.0 NTU,粒径>10 μm的悬浮颗粒物含量达49 CNT/mL);现有净水设施缺乏对无机离子的去除能力,生产用水腐蚀倾向严重;活性炭滤罐设计不合理,加剧了有机物的二次污染。

② 根据相关标准及设备操作说明的要求,应优先解决浊度和颗粒物未达标的问题,实现生产水质达标。微絮凝-超滤联用工艺小试结果表明,当混凝剂PAC投加量为25 mg/L时,该工艺对浊度、颗粒物总量的去除率分别达到98.0%、99.5%,出水浊度降至(0.32±0.04) NTU,粒径>10 μm的颗粒物含量降至10 CNT/mL,能够满足生产要求并显著降低生产成本。

③ 由于缺乏明确的标准和操作指南,而且去除成本较高,无机离子控制及有机物二次污染的问题将作为后续提标改造内容。建议采用反渗透技术进一步去除无机离子,并结合缓蚀剂进行水质调控,解决设备腐蚀和结垢问题。同时,建议缩短厂区供水管网、储水罐及超高压设备的清洗和维护周

期,减少二次污染,提高水质稳定性,延长设备零部件的使用寿命,降低生产成本。

参考文献:

- [1] 阎磊,刘超,邢菲,等. 柱塞式注水泵技术的改进应用[J]. 机械工程师, 2021(7): 109-110.
YAN L, LIU C, XING F, et al. Improved application of plunger water injection pump technology [J]. Mechanical Engineer, 2021(7): 109-110(in Chinese).
- [2] DU M, WANG H, DONG H, et al. Numerical research on multi-particle movements and nozzle wear involved in abrasive waterjet machining [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 117(9): 2845-2858.
- [3] SHAO C, GE Z, ZHOU Z, et al. Experimental and numerical investigation of abrasive water jet nozzle erosion [J]. Powder Technology, 2023, 430: 119031.
- [4] ARABNEJAD H, SHIRAZI S A, MCLAURY B S, et al. The effect of erodent particle hardness on the erosion of stainless steel [J]. Wear, 2015, 332/333: 1098-1103.
- [5] LI X, HUANG N, HE K, et al. On erosion wear of flat specimens incorporating roughness angle correction [J]. Physics of Fluids, 2024, 36: 109102.
- [6] KHALEDI M, MEHRABADI A R, MIRABI M. Developing an innovative corrosion and scaling index for industrial cooling water using artificial intelligence [J]. Journal of Water Process Engineering, 2024, 65: 105838.
- [7] LI X, GAO B, YUE Q, et al. Effect of six kinds of scale inhibitors on calcium carbonate precipitation in high salinity wastewater at high temperatures [J]. Journal of Environmental Sciences, 2015, 29: 124-130.
- [8] 张晓英,李素芹,雷海萍,等. 钢铁工业循环水中氯离子脱除工艺技术探讨[J]. 钢铁, 2022, 57: 153-159.
ZHANG X Y, LI S Q, LEI H P, et al. Discussion on removal of chloride ion from circulating water in iron and steel industry [J]. Iron and Steel, 2022, 57: 153-159 (in Chinese).
- [9] OSORIO-CELESTINO G R, HERNANDEZ M, SOLIS-IBARRA D, et al. Influence of calcium scaling on corrosion behavior of steel and aluminum alloys [J]. ACS Omega, 2020, 5(28): 17304-17313.
- [10] 代雪宁,李伟英,李悦,等. 中国南北两城市饮用水水质化学稳定性对比研究[J]. 中国给水排水, 2023, 39(1): 39-44.
DAI X N, LI W Y, LI Y, et al. Comparison of drinking water quality chemical stability between a northern city and a southern city in China [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(1): 39-44 (in Chinese).
- [11] 鄢闰辛,邓世俊,张雪娇,等. 两段式接触过滤法净化低浊水研究[J]. 水处理技术, 2022, 48(2): 119-123.
YAN R X, DENG S J, ZHANG X J, et al. Research on purification of low turbid water by two-stage contact filtration [J]. Technology of Water Treatment, 2022, 48 (2): 119-123 (in Chinese).
- [12] MALKOSKE T A, BÉRUBÉ P R, ANDREWS R C. Coagulation/flocculation prior to low pressure membranes in drinking water treatment: a review [J]. Environmental Science: Water Research & Technology, 2020, 6(11): 2993-3023.

作者简介:牛江月(2000—),女,河南洛阳人,硕士研究生,从事给水处理理论与技术研究。

E-mail:new121500@163.com

收稿日期:2025-01-07

修回日期:2025-04-09

(编辑:刘贵春)

精打细算用好水资源,从严从细管好水资源