文章编号：1000-5773(2004)03-0283-06

超高压水除锈技术及其阶段性方程*

薛胜雄[1,2] 王乐勤[1]，彭浩军[2]，樊毅斌[2]，陈正文[2]，
王永强[2]，于 雷[2]，朱华清[2]

(1. 浙江大学，浙江杭州 310005；
2. 合肥通用机械研究所，安徽合肥 230031)

摘要：水能生锈，也能除锈。以 200～250 MPa 的超高压纯水射流进行了除锈自动作业和防止返锈的一系列试验研究。阐述了高压水射流除锈这一成套设备创新技术，并对射流形成、流场模型和作业效率给出了各自阶段性的数理方程。试验证明：本课题参数优化，满足了实际作业的需要。

关键词：超高压水；除锈；阶段性；数理方程
中图分类号：O521.9 **文献标识码**：A

1 引 言

船舶除锈乃至大型罐槽除锈，至今仍是工程难题。钢质板材在海水中腐蚀，在空气中氧化，这种氧化层称为锈，金属表面在涂装前必须除去锈层，标准术语叫做表面预处理。

在除锈工艺历经了干喷砂和磨料射流之后，笔者与国外研究者同步[1~3]，提高压力，实现 200～250 MPa 超高压纯水射流，继而提高泵机组功率籍以达到所期望的除锈速度；进入 20 世纪 90 年代后期，则将主攻方向瞄准解决除锈返锈问题，以自动爬壁机器人取代人工手持喷枪，以真空回收锈渣，确保机器人附壁等，这一以超高压水射流技术为核心的成套技术的实现，使我国成为世界上少有的解决以水除锈工程应用的国家之一，湿式除锈将很快进入商品化应用。

2 超高压水射流除锈成套技术

利用 200～250 MPa 超高压旋转水射流，除锈质量达到 Sa2.5 级“白金”程度。机器人爬壁作业、除锈不返锈、锈渣回收。成套技术主要包括以下三部分：250 MPa、160 kW 超高压泵机组、爬壁机器人系统和真空吸附与排渣系统。图 1 为超高压水射流除锈成套设备示意图。

2.1 超高压泵机组

超高压泵机组为该套设备的主机，其技术参数为：压力 $p=200\sim250$ MPa，流量 $Q=30$ L/min，机组功率 $N=160$ kW。

由于是纯水射流作业，超高压就成为必然，因为剥除锈层的打击力与射流压力成正比，而超高压、大功率泵机组本身就是难度很大的课题，其投资占成套设备的 70%以上，又悠关成套设备运行的可靠性。

由柴油机、减速机驱动三柱塞超高压泵，以一级增压将常压水泵送为超高压水，又由于三柱塞泵压力波动的平缓，即可直接由超高压软管输送到喷嘴，形成水射流作业。对泵而言，完成这一目标，关键要解决以下难题：柱塞往复运动的平均速度要尽可能低于 0.15 m/s；柱塞往复密封副，则采用“难以加工

* **收稿日期**：2004-04-09；**修回日期**：2004-06-21
基金项目：科技部院所基金项目
作者简介：薛胜雄(1957—)，男，博士研究生，研究员，长期从事高压、超高压水射流清洗、除锈、切割、破碎技术与设备的生产与研究. E-mail：flow@chiflow.com.cn

出”的弹性筒间隙密封与芳纶填料密封间置，保证既要形成超高压工况，又要在往复运行中不因摩擦发热而抱死；进、出水阀组多采用阀芯与阀座偶配研磨的平板阀形式；超高压缸体材料、工艺及其结构设计应避免应力集中问题；气动活塞式溢流阀控制泵机组的运行。与此同时，还应注意泵的有压供水，水的精密过滤(10 μm)，超高压水输出信号反馈控制柴油机转速，以保证泵在额定功率压力下运行等，泵的压力是由阀或喷嘴截流形成的，而泵合理的设计与成套配置则是形成并保持这种超高压工况的动力。

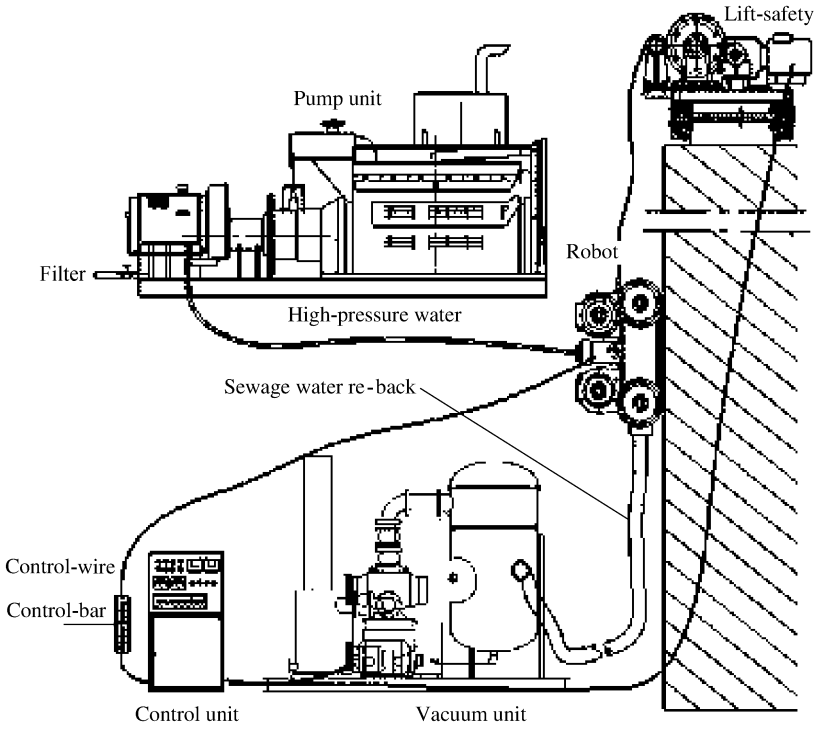


图 1 爬壁机器人成套示意图

Fig. 1 Automatic wall cleaner

2.2 爬壁机器人清洗器

超高压水射流在高空作业，因水射流的反冲力作用，必须以爬壁机器人取代人工手持喷枪作业。在这两者之间的过渡阶段，美国、德国制造业曾应用高空作业车长臂强制平面清洗器，其结果是很不灵活。

爬壁机器人主要解决以下三个问题：行走、附壁和射流。

行走：采用双回路电机驱动机构，该机构将机器人 4 只行走轮分为左右两组，分别由两台微型电动机通过减速机驱动，当两台电机转向与转速都一致时，机器人清洗器作直线往复运动；当两台电机造成速度差(降低其中一台电机的速度)，则机器人清洗器作转向动作，从而实现“之”字形换行。这里要求电机的输出扭矩要足以克服机器人重力、真空吸附力和摩擦力等。

附壁：机器人靠外来真空附壁，要求真空吸力(60 kPa 真空度)产生的附壁扭矩大于机器人本身因其重量、拖带物重量(水管、气管、电缆、管内水重量)和真空吸力所产生的滚动摩擦力矩共同构成的倾覆力矩，机器人附壁真空腔由橡胶材料制作。

射流：机器人作为执行机构，安装有超高压旋转接头和由 4 只喷嘴组成的喷头，喷头的旋转运动由喷嘴射流的反冲力所形成的扭矩驱动来实现；旋转接头凭借平板间隙密封，使得喷头做到超高压自旋转稳定可靠。同时调整喷嘴(杆)的安装角度，可以调节喷头旋转速度。

机器人技术参数：最大行走速度 46.3 mm/s，清洗速度 50 m^2/h，清洗宽度 300 mm 真空腔内径 330 mm，喷头旋转速度 400～600 r/min(可调)，真空腔内最大真空度约 600 kPa，质量 55 kg。

2.3　真空系统

真空系统有两大功能:确保机器人附壁和及时抽吸锈屑与废水。

显然,真空泵的真空度与抽气量的选择,首先必须满足机器人附壁的要求,即达到足够的附壁力矩;其次抽气量要与射流流量和剥除锈屑的速度相适应。在超高压工况下,由于流体的可压缩性,水由常压下的常温达到超高压下的 80～90 ℃,加之旋转射流的雾化,在真空腔内形成了均匀的高温场。在真空作用下,锈屑与废水被及时抽吸,高温场就使部分废水汽化蒸发,造成水射流除锈即除即干的结果,这正是人们多年追求的目标——解决水除锈的返锈问题。

真空系统一旦失灵,机器人将失落。为此,以一台或两台卷扬机输送钢丝绳,对机器人清洗器实施高空保险。

抽吸后的锈屑与废水再经过滤,达到可排放标准。

2.4　成套系统

可见,以上三组系统的参数匹配、运行速度的控制至关重要,单位时间的除锈去除量 V 则是各系统特征参数的函数,也就是说:各系统间相互制约,和谐作业,它们的组合则最终表现在除锈量或除锈深度(质量)上。

其次,成套系统的智能化控制,实现了远控操作机器人高空作业的目标。该机器人不但能够实现垂直壁面、曲面的爬行、甚至能实现顶面的爬行。换上履带,又能适应大型罐槽罐底油泥的清除。

3　超高压水射流除锈机理分析

3.1　射流从喷嘴射出的解析描述[4,5]

从喷嘴内壁到射流中心,射流速度由零逐渐增大,在轴心处达到最大值。不计摩擦和液体收缩的损失,液体无摩擦的理想流速计算公式如下

$$v_{id}=\sqrt{2p_0\rho_0^{-1}(1-\gamma p_0)} \tag{1}$$

式中:v_{id}为射流在喷嘴出口处的理想流速, m/s;p_0 为液体进入喷嘴入口前的压力, MPa;γ 为液体压力 p_0 下的可压缩性系数;ρ_0 为非压缩状态下液体的密度,kg/m^3。

喷嘴内雷诺数的有效值

$$Re=\frac{\sqrt{2}}{2}d_0\rho_0 v_{id}\eta^{-1} \tag{2}$$

式中:d_0 为喷嘴内径,m;η 为液体动力粘度系数。喷嘴出口处射流核心断面速度

$$v_{oc}=v_{oa}\left[1-\left(\frac{2r}{d_0}\right)^{\lg(Re+1)}\right] \tag{3}$$

式中:v_{oc}为喷嘴出口处射流核心截面速度,m/s;v_{oa}为喷嘴出口处射流轴向速度,m/s;r 为射流横截面基环半径,m。由(3)式,可确定在静止边界内轴对称液体流动的速度分布,因此可以得出喷嘴出口处的速度分布。

为了描述喷嘴外射流的发展,有必要考虑喷嘴出口压缩液体的扩张。最小射流扩散的计算公式如下

$$L_{disp}=\sqrt{2\mu p_0\rho_0^{-1}(1-\gamma p_0)}\ \frac{d_0}{2v_e} \tag{4}$$

式中:μ 为溢流系数,是喷嘴收缩系数和速度系数的函数

$$\mu=\alpha_c(1-0.184Re^{-0.2}l_0) \tag{5}$$

$$v_e=\sqrt{2\left(p_0-\frac{1}{2}\rho_0 v_{oa}^2-p_{at}\right)\rho_0^{-1}} \tag{6}$$

式中:α_c 为喷嘴收缩系数;l_0 为直径为 d_0 处喷嘴出口圆柱段的长度,m;v_e 为射流的扩散速度(射流喷射出喷嘴后); p_{at}为标准大气压力,MPa。

3.2　圆型射流场的数学模型[6]

每一束射流形成了一个圆型射流场,而 4 束射流的旋转复合运动又形成了一个更大的圆型射流场,

作以下基本假设:(1) 流体的运动是无粘性不可压缩无旋运动;(2) 涡环为环形圆纹曲面;(3) 涡环从喷嘴出口脱落时圆截面半径 R_0 远小于涡环半径 A_0,即 $\varepsilon=R_0/A_0\ll 1$。

若势函数和流函数分别为 Φ 和 Ψ,轴向速度、径向速度和涡量分别为 u、v_r 和 ω,涡环位置为(x', r'),则半径在点 $P(x,r)$处的 u、v_r、ω、Ψ 为

$$u=-\frac{1}{r}\frac{\partial\Psi}{\partial r} \tag{7}$$

$$v_r=\frac{1}{r}\frac{\partial\Psi}{\partial x} \tag{8}$$

$$\omega=\frac{\partial v_r}{\partial x}-\frac{\partial u}{\partial r}=\frac{1}{r}\left(\frac{\partial^2\Psi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\Psi}{\partial r^2}-\frac{1}{r}\frac{\partial\Psi}{\partial r}\right) \tag{9}$$

$$\Psi=-\frac{\Gamma\lambda rr'}{4\pi}\int_0^{2\pi}\frac{\cos\theta}{K}\mathrm{d}\theta \tag{10}$$

式中

$$K=\left|(x-x')^2+r^2+r'^2-2rr'\cos\theta\right|^{1/2}$$

令

$$r_1^2=(x-x')^2+(r-r')^2,r_2^2=(x-x')^2+(r+r')^2$$

则

$$\Psi=-\frac{\Gamma}{8\pi}(r_1^2+r_2^2)\int_0^{\pi}\left(r_1^2\cos^2\frac{\theta}{2}\right)^{-1/2}\mathrm{d}\theta-2\int_0^{\pi}\left(r_1^2\cos^2\frac{\theta}{2}+r_2^2\sin^2\frac{\theta}{2}\right)^{1/2}\mathrm{d}\theta=$$

$$-\frac{\Gamma}{2\pi}rr'^{-1/2}\left[\left(\frac{2}{k}-k\right)F_1(k)-\frac{2}{k}E_1(k)\right] \tag{11}$$

式中:$F_1(k)$和 $E_1(k)$分别为第一类完全椭圆积分和第二类完全椭圆积分,并且

$$k^2=1-\frac{r_1^2}{r_2^2}=\frac{4rr'}{(X-X')^2+(r+r')^2}$$

利用 Landen 变换,可进一步求得流函数和势函数分别为

$$\Psi=-\frac{\Gamma}{2\pi}(r_1+r_2)\mid F_1(\lambda)-E_1(\lambda_1)\mid \tag{12}$$

$$\Phi=\frac{1}{2}\Gamma a\int_0^{\infty}\mathrm{e}^{-kx}J_0(kr)J_1(ka)\mathrm{d}k \tag{13}$$

式中:J_0 和 J_1 分别为涡环内和涡环外两部分。

3.3 作业效率[7,8]

一系列分析的最终着点为作业效率,即在一定水射流工况参数下的除锈(剥层)效率和水的消耗量。显然

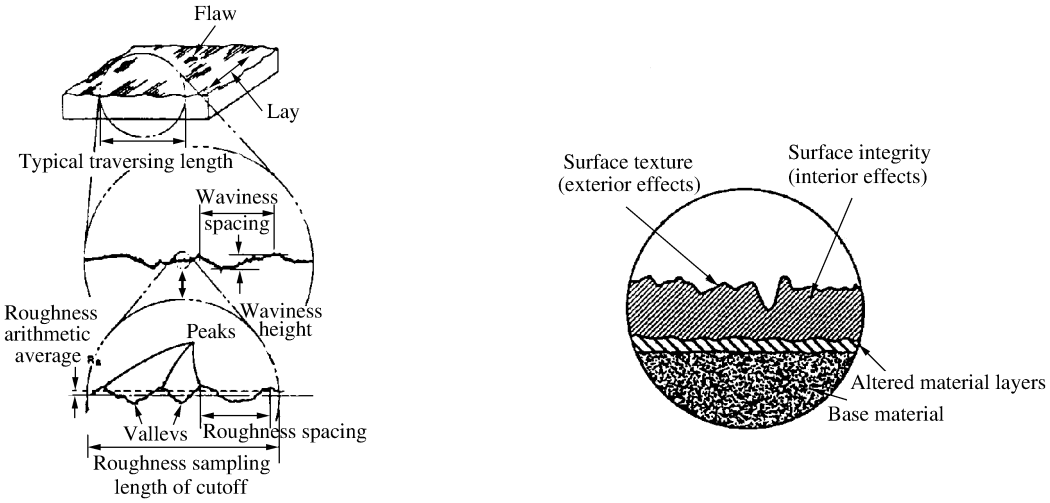
$$R_r=TWh_m \tag{14}$$

$$W_c=\frac{C_D\pi D_n^2(2p/\rho_w)^{1/2}}{4R_r} \tag{15}$$

式中:R_r 为剥层量, m^2/min;T 为清洗器作业速度,m/min; W 为清洗器作业宽度,m;h_m 为锈层平均厚度,m; W_c 为单位面积水的耗量,m^3/m^2;D_n 为喷嘴直径,mm;p 为射流压力,MPa;ρ_w 为水的密度;C_D 为水嘴射流系数,对于 D_n,经验给出 $C_D=0.7$。

4 除锈机理图解[9~13]

图 2 所示为锈层微观形状,图 2(a)为表面形貌,由图形的依次微化可见,还是归结到粗糙度问题;图 2(b)为表面效应,将钢质表面分为:本体材料,转变材料层和完整表面层(该层又分外表效应和内表效应)。显然,除锈目标:首先是根据除去整体表面层且越过谷底,然后根据不同除锈等级要求,确定除锈至转变材料层的程度,而不破坏母体材料。



(a) Surface topography　　(b) Surface effects

图 2　钢质表面锈层形貌和效应

Fig. 2　Surface topography and effects of steel material

如图 3 所示,由于旋转射流及其运动的作用,流线改变了方向,形成了弯矩作用、集中冲击作用和剪切载荷作用,尤其对不规则的锈层表面。在承受高弯矩部位,旋转射流形成的高剪切载荷发挥着重要作用。

将喷嘴呈一定角度安装,既形成了喷头的旋转扭矩,又对不规则表面形成了弯曲打击力和剪切剥层力。试验表明,剪切剥层力要求喷嘴角度在 30°～60°之间为佳;弯曲打击力要求喷嘴角度在 60°～90°之间为佳。综合两者的要求,实际应用的喷嘴安装角度总是以喷嘴-喷杆-旋转体三者相对位置形成二维平面安装的要求(见图 4)。

锈层也会出现个别的裂缝或凹坑现象,这种裂缝或凹坑常常会浸入到本体材料层,称之为点蚀。对于点蚀清除,需在大面积除锈后个别清除,或用超高压喷枪或用人工锤击。

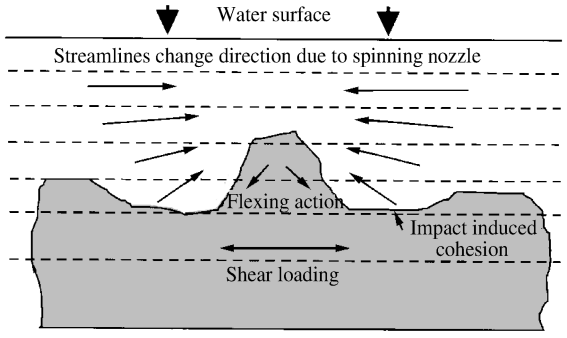


图 3　在射流作用下不规则表面受力图

Fig. 3　Interaction of jets and the irregular surface

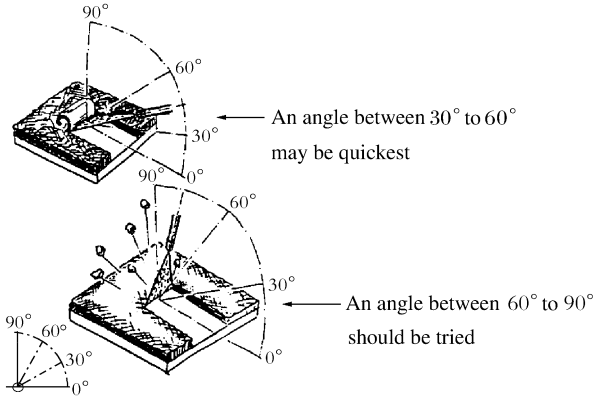


图 4　射流的法向打击与切向剥层机理

Fig. 4　The tangential jet and normal jet

5　结　论

(1) 超高压纯水射流的优化工况参数为:p=200～250 MPa,Q=30 L/min,N=160～200 kW,除锈质量达到 Sa2.5 级"白金"程度,除锈速度 50 m^2/h;

(2) 除锈成套技术包括:机器人爬壁作业、超高压大功率泵机组和真空系统,其关键技术是超高压旋转射流的形成和旋转往复密封;

(3) 高速射流的高温工况、真空抽吸与旋转射流的均匀流场是形成"用水除锈不返锈"的主要条件;

(4)旋转射流的弯矩作用、集中冲击作用和剪切载荷作用是除锈的动力源。

References:

[1] Xue S X. High Pressure Water Jet Technology and Application [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1998. (in Chinese)
薛胜雄. 高压水射流技术与应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.

[2] Summers D A. Waterjetting Technology [M]. New York: E & FN SPON, 1995.

[3] SSPC. Surface Preparation & Coalings Handbook [Z]. Pisbury, 1994.

[4] Hlavagova I M, Hlavag L M. Quick Method for Determination of the Velocity Profile of the Axial Symmetrical Supersonic Liquid Jet [A]. 10th American Waterjet Conference [C]. Houston, US: WJTA, 1999. 189－200.

[5] Hlavagova I M, Hlavag L M. Research of Waterjet Interaction with Submerged Rock Materials [A]. 2001 WJTA American Waterjet Conference [C]. Minneapolis, US: WJTA, 2001. 617－624.

[6] Wang Z M. The Numerical Simulation on the Flow Structure for Ring-Shaped Jet Field [A]. High Pressure Waterjet Technology Research on Oil-Gas Wall Engineering [C]. Dongying, Shandong: Petroleum University Press, 1998. (in Chinese)
汪志明. 圆形射流流场流动结构的数值模拟 [A]. 油气井工程高压水射流技术研究 [C]. 山东东营: 石油大学出版社, 1998.

[7] Schmid R. Ultra High Pressure Waterjetting for Coating Removal [A]. Proceeding of 10th American Waterjet Conference[C]. Houston, US: WJTA, 1999. 895－902.

[8] Louis H. Experimental and Theoretical Investigation of the Decoating Process by Pure Waterjet [A]. Proceeding of 10th American Waterjet Conference [C]. Houston, US: WJTA, 1999. 695－706.

[9] Xue. Difference and Similarity of Glue Removal for Airport Concrete Runway and Bilumen Runway [A]. Proceedings of the 2001 WJTA America Waterjet Conference [C]. Minneapolis, US: WJTA, 2001. 589－600.

[10] Frenzel L. Continuing Improvement Initiatives of Surface Preparation with Waterjetting [A]. Proceeding of the 9th American Waterjet Conference [C]. Houston, US: WJTA, 1997. 697－716.

[11] Kim Thomas J. An Overview of Waterjet Fundamentals and Applications [M]. Saint Louis, US: Water Jet Technology Association, 2003.

[12] Kunapom S. Mathe matical Modeling of Ultra High Pressure Waterjet Peening [A]. Proceeding of the 2003 American Waterjet Conference [C]. Houston, US: WJTA, 2003.

[13] Eng. Luis E. Comparision of Surface Preparation Using Different Methods [A]. Proceeding of the 11th American Waterjet Conference [C]. Minneapolis, US: WJTA, 2001. 745－763.

UHP Waterjet Remove Rust Technology and Its Stage Equations

XUE Sheng-Xiong[1,2], WANG Le-Qin[1], PENG Hao-Jun[2], FAN Yi-Bin[2],
CHEN Zheng-Wen[2], WANG Yong-Qiang[2], YU Lei[2], ZHU Hua-Qing[2]

(1. *Zhejiang University*, *Hangzhou* 310005, *China*;
2. *Hefei General Machinery Research Institute*, *Hefei* 230031, *China*)

Abstract: Rusting with water, but removing with water too. Ultra-high pressure waterjet with pressure 200～250 MPa has been used to remove rust automatically and to prevent from re-rusted in a series of testing research. This paper describes the creation of a new assemblied ultra-high pressure waterjet rust removal set-up and its working principle in every step, including jet formation, flow-yard model and working efficiency.

Key words: ultra-high pressure; remove-rust; step; mathematical equation