

高压射流式水下洗网机喷嘴的设计

胡 昱, 郭根喜, 黄小华, 陶启友

(中国水产科学研究院南海水产研究所, 广东 广州 510300)

摘要: 为解决深水网箱养殖过程中因网衣附着生物而影响水体交换, 并给换网及网衣清洗带来极大困难等问题, 开发水下洗网机并提高水下洗网机的清洗效率, 是深水网箱养殖的重要配套装备与技术。通过对高压射流水下洗网机工作原理的分析, 基于能量方程, 推导出洗网机关键部件喷嘴的结构几何参数计算表达式。合理选择高压水发生系统的压力和流量, 计算出喷嘴的孔径与长径比。在此基础上计算高压射流水下洗网机水力参数, 为进一步优化洗网机结构提供理论依据。

关键词: 水下洗网机; 水射流; 喷嘴; 深水网箱

中图分类号: S969.39

文献标识码: A

文章编号: 1673-2227-(2008)04-0016-05

Nozzle design of high-pressure free-jet-type submarine net cleaning machine

HU Yu, GUO Genxi, HUANG Xiaohua, TAO Qiyu

(South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China)

Abstract: In order to solve the problem of fouling organisms blocking water exchange for deep-water cage and thus caused great difficulty in net changing and cleaning, developing submarine net cleaning machine and improving its cleaning efficiency were the important supporting facilities and technology for deep-water cage culture. Through analysis of operation principle of high-pressure submarine net cleaning machine, the structure geometric parameters calculation expression of nozzle were deduced based on energy equation. Optimal pressure and flow in high pressure water generating system were selected, and aperture/slenderness ratio of nozzle was calculated. Hydraulic parameters were calculated. These parameters supplied theoretical support for optimizing the structure of net washing machine.

Key words: submarine net cleaning machine; water free jet; nozzle; deep-water cage

随着中国深水网箱的快速发展, 网箱囊网附着物的清洗在深水网箱养殖过程中成为一个越来越突出的问题^[1-4]。北欧一些国家, 深水网箱洗网机已相当成熟, 多见于喷射式高压冲洗, 但对其理论研究方面的报道较少。国内工业清洗技术较为成熟,

但对网衣清洗设备的研究较少。宋协法等^[5]采用高压水流与毛刷清洗相结合的清洗方法, 研制出涡旋水流式网箱清洗设备, 但对设备关键部件喷嘴没有进一步的研究。

高压射流水下洗网机采用物理清洗的方法, 利

收稿日期: 2008-03-21; 修回日期: 2008-04-18

资助项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2006AA100302; 2006AA100301); “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAD09A14)

作者简介: 胡昱(1982-), 男, 硕士, 从事渔业设施工程技术与装备研究。E-mail: airfish07@yahoo.com.cn

通讯作者: 郭根喜, E-mail: scsggx@21cn.com

用高压水流的能量对网附着物进行清洗。由于洗网机在水下工作，其清洗状况比在空气中清洗状况更为复杂^[6]。洗网机直接清洗工具与核心部件是喷嘴，故对喷嘴的研究有利于为进一步优化洗网机结构，以提高高压射流水下洗网机的清洗效率。

1 高压射流式水下洗网机工作原理

高压射流清洗系统由柴油机、高压水泵、软管与硬管、清洗机部件组成（图1）。柴油机将化学能转化为机械能，带动高压泵产生高压水，通过管道将高压水接入高压密封螺帽的中心通孔后，流经高压导管轴内部水流通道，进入高压仓，并自高压仓上的高压喷嘴喷出，利用高压水流喷射的反冲力实现对网衣的旋转式清洗；在高压仓前盖上斜向设置的高压喷嘴使得高压水流在冲击网衣的同时又能随高压仓一起转动，增大了网衣清洗的面积，提高了清洗效率。洗网机清洗部件模型见图2。

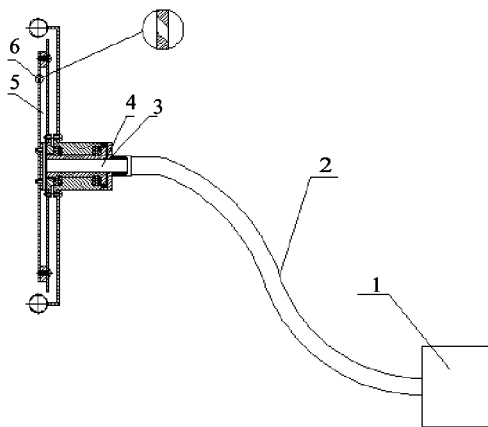


图1 高压射流式洗网机结构图

1. 高压水泵；2. 管道；3. 高压密封螺帽；4. 导管轴；
5. 高压仓；6. 喷嘴

Fig.1 Sketch of working principle for net cleaning machine

1. high-pressure pump; 2. pipe; 3. high-pressure sealed nut;
4. conduit shaft; 5. high-pressure barn; 6. nozzle

2 喷嘴基本参数的设计

高压射流清洗的效果集中体现在清洗作用力上，包括射流水本身具有的清洗作用和通过喷嘴获得的速度、经动能转换对清洗对象的冲击力^[7]。

喷嘴是水射流设备的重要元件，它最终形成了

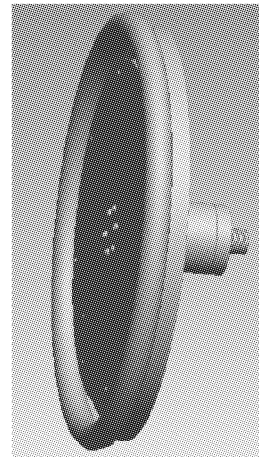


图2 洗网机清洗部件模型

Fig.2 Model parts of net cleaning machine

水射流工况，同时又制约着系统的各个部件，它的功能不但是把高压泵提供的静压转化成水的动力，而且必须让射流具有优良的流动特性和运动特性，同时，喷嘴又是高压水射流清洗机的执行元件。研究和工程实践表明，喷嘴的几何形状、结构参数等对射流的性能具有重要的影响^[8]。由于水下清洗的复杂性，对水射流参数提出了更高的要求，故喷嘴在整个设计中起着至关重要的作用。

2.1 喷嘴的几何形状

不同的喷嘴形状会得到不同的射流效果。对于不同的喷嘴型式，按形状分有圆柱形喷嘴、扇形喷嘴、异形喷嘴等。在喷嘴直径、压力、喷嘴到作用面的距离和作用时间相同的条件下，圆柱形喷嘴的射流效果好，可获得聚集能量较好的集束射流，以得到较大的射流冲击力。扇形喷嘴直接由喷嘴形状产生均匀的扁平射流，扩散角也可在较大范围内变化。但扇形喷嘴射流效率低，其主要原因是因为射流被扩散时，大部分喷射能量损耗于喷嘴自身所致^[9]。因此，在实际工程设计中，通常会选择圆柱形喷嘴。同时，圆柱形喷嘴加工简单，使用范围最为广泛。

2.2 喷嘴孔径计算

喷嘴喷孔的直径是喷嘴设计时首先要选定的重要参数，也是确定其它参数的依据^[10]。

首先，从水泵出水管进口到高压仓2个截面之间使用伯努利方程得^[11]：

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + h_w \quad (1)$$

式中 z_1 为水泵出水管进口处静水头； z_2 为洗网机高压仓静水头； p_1 为水泵出水管进口处压力； p_2 为洗网机高压仓压力； v_1 为水泵出水管进口处高压水速度； v_2 为洗网机高压仓处高压水速度； h_w 为管路流动损失，包括沿程损失 h_f 和局部损失 h_j 。

$$h_w = \sum h_f + \sum h_j = \sum \lambda_i \frac{L_i v_1^2}{d_i 2g} + \sum \zeta_i \frac{v_j^2}{2g} \quad (2)$$

由于系统管路较短，故流体能量的沿程损失较少。而流体在弯头、阀门、弯管、压强调节阀等地方都将引起部分能量损失，故局部损失在此系统中占主导地位^[12]，于是

$$h_w = \zeta_c \frac{v^2}{2g} \quad (3)$$

ζ_c 为综合损失系数。

$$\text{由 2 个断面连续方程：} q = \frac{1}{4} v_1 \pi d_1^2 = \frac{1}{4} v_2 d_2^2 \quad (4)$$

$$\text{可得到高压仓内的压强：} p_2 = p_1 + \rho g (z_1 - z_2) + \frac{8\rho q^2}{\pi^2} \left(\frac{1 - \zeta_c}{d_1^4} - \frac{1}{d_2^4} \right) \quad (5)$$

接着，在喷嘴入口与喷嘴出口之间使用伯努利方程得：

$$z'_1 + \frac{p'_1}{\rho g} + \frac{v'^2_1}{2g} = z'_2 + \frac{p'_2}{\rho g} + \frac{v'^2_2}{2g} \quad (6)$$

由于 2 个相距较近，暂不计水头损失。式中 z'_1 为喷嘴入口处静水头； z'_2 为喷嘴出口处静水头； p'_1 为高压水喷嘴入口压力； p'_2 为高压水喷嘴出口压力； v'_1 为高压水喷嘴入口速度； v'_2 为高压水喷嘴出口速度。

由于 2 个断面在同一高度，故 $z'_1 = z'_2$

$$\text{此时，} \frac{p'_1 - p'_2}{\rho g} = \frac{z'^2_1 - z'^2_1}{2g} \quad (7)$$

$$\text{由于 2 个断面之间，} q = \frac{1}{4} z'_1 \pi d'^2_1 = \frac{1}{4} z'_2 \pi d'^2_2 \quad (8)$$

$$\text{故 } z'_2 = \sqrt{\frac{2(p'_1 - p'_2)}{\rho \left[1 - \left(\frac{d'_2}{d'_1} \right)^4 \right]}} \quad (9)$$

由于 $p'_1 \gg p'_2$ ， $d'_1 \gg d'_2$ ，则公式可以简化为：

$$v'_2 = \sqrt{\frac{2p'_1}{\rho}} \quad (10)$$

将式 (10) 代入式 (8)，可得到

$$d = \sqrt{\frac{4q}{\pi \sqrt{\frac{2p'_1}{\rho}}}} \quad (11)$$

此时 $p'_1 = p_2$

考虑到流量系数及喷嘴效率系数及喷嘴孔数^[13]，得到喷嘴直径

$$d = 0.69\eta \sqrt{\frac{q}{\mu n \sqrt{p}}} \quad (12)$$

式中 q 为射流流量 ($L \cdot \min^{-1}$)； p 为射流压力 (Mpa)； n 为喷嘴孔数，选取 $n = 3$ ； μ 为喷嘴流量系数 (0.9 ~ 0.92)； η 为喷嘴效率系数 (1.05 ~ 1.3)。

喷嘴的孔数越少，射流力越大；喷嘴的孔数越多，射流力越小，但清洗面比较大^[14]。为实现洗网机旋转式清洗网衣，提高清洗效率，选择 3 个喷嘴，在圆周方向以间隔 120° 均匀分布在洗网机高压仓上。

2.3 喷嘴的长径比

喷嘴的长径比是影响喷射状态的另一个重要的参数，它直接影响到喷嘴的流动阻力、流量系数等。它的大小决定了喷嘴属薄壁孔还是厚壁孔，从而使经过喷嘴的水流具有不同的流动状态。根据流体力学原理，厚壁孔有较高的流量系数，因此具有较高的压力能——喷射速度能转换成效率，通常取长径比 $L/d = 2 \sim 4$ ^[9]。

2.4 计算结果

依据网衣附着物情况选择高压泵的压力 9 Mpa，流量为 $100 L \cdot \min^{-1}$ 。最终计算得到喷嘴直径 $d = 2.77 \text{ mm}$ ，长径比 $L/d = 3$ ，得到 $L = 8.31 \text{ mm}$ 。

3 射流参数

3.1 射流压力

射流压力大小主要针对网衣上的附着物是否能够有效地破坏，射流的冲击力要大于网衣附着物的附着强度。通常为保证清洗效果，倾向于提高高压泵的工作压力，但是不能简单认为压力越高越好。系统压力越高，对清洗机元件的材料与制造性能以

及装置的密封性要求也提高^[13]。

人们通常把水射流压力理解为清洗机或者水泵铭牌上的额定压力，实际上铭牌上的压力是静压力，由压力表可以直接读出。而水射流的压力是动压力，难以测量，此时其静压力已转化为水射流的动压力或速度能。

3.2 射流速度

射流的流速取决于喷嘴出口截面的压力降，水射流是能量转变与应用的一种形式。通常动力驱动泵将一定量的水送到高压管路，使其以一定能量到达喷嘴，高压水流经过喷嘴喷出。由式(12)可得：

$$v = 44.72 \sqrt{P} \quad (13)$$

式中 P 为喷射压力 (MPa)。

3.3 射流流量

射流流量是根据射流出口速度 V 和喷嘴出口截面积 A 决定的。表达式为：

$$q = VA = 44.72A \sqrt{P} = 2.1d^2 \sqrt{P} \quad (14)$$

式中 d 为喷嘴直径 (mm)； P 为喷射压力 (MPa)。

在保证一定的清洗附着物的喷射压力下，获得较大的清洗面积，泵的流量主要体现清洗速度的快慢即清洗效率。在同样压力下，流量大则传递的能量更多，清洗进度更快。因此在选择清洗设备时，高压水发生系统的压力与流量的合理选择与匹配是很重要的^[13]。

3.4 射流功率

喷嘴的射流功率就是产生射流的压力与喷嘴面积的函数，而喷嘴直径的变化对射流功率的影响远比压力的变化影响要大^[14]。射流的功率代表射流的总工作能力，对于水射流

$$N = \rho q \frac{v^2}{2} \quad (15)$$

将式(13)代入式(15)可得到射流功率的另一种表达形式：

$$N = 16.7Pq \quad (16)$$

它与射流的压力和流量成正比。提高射流的压力和流量都能提高射流的功率，且两者都与射流功率成正比。

3.5 射流反冲力

在喷嘴出口截面内外 2 点间应用动量定理

有^[15]：

$$F \Delta t = mv'_2 - mv'_1 \quad (17)$$

由连续方程及作用力与作用反力可得射流方向的反冲力为：

$$F = \rho q v \quad (18)$$

将式(13)、(14)代入可得到反冲力的另一种表达形式：

$$F = 1.56d^2 P \quad (19)$$

3.6 计算结果

通过对洗网机喷嘴射流水力参数的计算，其计算结果如表 1 所示。

表 1 洗网机水射流水力参数

Tab. 1 Hydraulic parameters of water jet net cleaning machine

参数 parameter	公式 formula	结果 result
射流速度/ $m \cdot s^{-1}$ jet velocity	$v = 44.72 \sqrt{P}$	133.4
射流流量/ $L \cdot min^{-1}$ jet flow	$q = 2.1d^2 \sqrt{P}$	48.3
射流功率/W jet power	$N = 16.7Pq$	14 860
射流反冲力/N jet recoil strength	$F = 1.56d^2 P$	106.5

4 小结

高压射流水下清洗是一个复杂的过程，此文依据水射流理论，对洗网机喷嘴进行了分析，结论如下：

(1) 根据网衣附着物的清洗工况，设计的洗网机选择圆柱形喷嘴，在高压仓圆周方向设置 3 个喷孔，以实现洗网机旋转式清洗。推导公式并计算得到喷嘴的基本参数，喷嘴直径为 $d = 2.77$ mm，喷嘴最佳长度为 $L/d = 3$ ，可得 $L = 8.31$ mm。

(2) 计算得到洗网机喷射速度 $v = 133.4$ $m \cdot s^{-1}$ 、射流流量 $q = 48.3$ $L \cdot min^{-1}$ 、射流功率 $N = 14.86$ kW、射流反冲力 $F = 106.5$ N 等水射流参数，为整个射流系统进一步优化提供理论依据。

(3) 完成洗网机设计后，尚未开展深水网箱网衣清洗的现场实用性测试，有待在综合考虑其实用性、经济性和安全性基础上，进行反复试验确定

其最优参数值,研制出具有较高清洗效率的水下洗网机。

参考文献:

- [1] 郭根喜. 我国深水网箱养殖产业化发展存在的问题与基本对策 [J]. 南方水产, 2006, 2 (1): 66-70.
- [2] 郭根喜, 陶启友. 我国深水网箱养殖技术及发展展望 (下) [J]. 科学养鱼, 2004 (9): 10-11.
- [3] HODSON S L, LEWIS T E, BURKE C M. Biofouling of fish-cage netting: efficiency and problems of in situ cleaning [J]. Aquac, 1997, 152 (1/4): 77-90.
- [4] HUANG Z G, LI Z Y, BRAIN M, et al. Biofouling of cage mariculture zones in the southern waters of Hong Kong [J]. Asian Mar Biol, 1999, 16: 77-99.
- [5] 宋协法, 贾瑞, 马玉霞. 涡旋水流式网箱清洗设备的设计与实验 [J]. 中国海洋大学学报, 2006, 36 (5): 733-738.
- [6] 邹俭. 水下高压洗净及洗净机简介 [J]. 洗净技术, 2004, 2 (3): 18-20.
- [7] 王科社, 贡海龙, 顾瑞龙. 高压水射流喷嘴特性研究 [J]. 液压与气动, 2007 (6): 76-78.
- [8] 魏德军, 曹仲文, 李萍. 喷嘴形状对喷射能力的影响 [J]. 辽宁化工, 2006, 35 (7): 416-418.
- [9] 卢晓江, 何迎春, 赖维. 高压水射流清洗技术及应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 17-18.
- [10] 王宝护. 高压清洗机喷嘴的计算 [J]. 干燥技术, 2006 (8): 65-66.
- [11] 吴持恭. 水力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 71-72.
- [12] 张国强, 吴家鸣. 流体力学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 137-138.
- [13] 陈玉凡. 提高高压水射流打击效率理论分析 [J]. 清洗世界, 2006, 22 (10): 32-35.
- [14] 刘俊, 秦臻. 高压水射流清洗作业中喷嘴的设计原理和选型依据 [J]. 管道技术与设备, 2007 (5): 43-44.
- [15] 魏银好, 张东速, 王磊. 自进式旋转水射流自进力的计算 [J]. 煤矿机械, 2007, 26 (8): 14-15.