

· 施 工 ·



## 基于 CFD 的绞吸船绞刀防石设备水力性能研究

周志强<sup>1</sup>, 杨正军<sup>2</sup>, 文 栋<sup>1</sup>

(1. 中交天航滨海环保浚航工程有限公司, 天津 300450; 2. 中交天津航道局有限公司, 天津 300461)

**摘要:** 绞吸船施工过程中常常会遇到石块、杂物糊堵吸入口或泥泵而影响绞吸船的连续施工, 目前解决该问题最有效的方法是在绞刀处加装防石设备。然而防石设备没有标准的形式, 不同单位研制了不同的防石设备, 各种防石设备对绞吸船吸入能力的影响一直没有办法定量评估。首先总结了目前常用的防石设备形式, 然后采用 CFD 方法对加装不同防石设备前后绞吸船吸入口附近流场进行模拟, 计算加装防石设备前后绞吸船的吸入段水力损失, 确定了由于加装防石设备造成的局部水力损失系数。经研究表明, 防石网和双防石环结构引起的水力损失较大, 单防石环和犬牙式防石格栅水力损失最小。为选择防石设备提供了基础数据。

**关键词:** CFD; 绞吸船; 防石设备; 水力损失

中图分类号: U 616<sup>+</sup>.21

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)08-0163-05

### Hydraulic characteristics of anti-stone device in cutter head of cutter suction dredger based on CFD

ZHOU Zhi-qiang<sup>1</sup>, YANG Zheng-jun<sup>2</sup>, WEN Dong<sup>1</sup>

(1. CCCC Tianjin Dredging Co., Ltd., Tianjin 300450, China;

2. CCCC-TDC Binhai Environmental Channel Dredging Co., Ltd., Tianjin 300461, China)

**Abstract:** The construction process of the cutter suction dredger will be stopped by the blockage of stone frequently, and the best way at present is to install anti-stone device in the cutter head. But there is no national standard for it. Different companies have developed different types of anti-rock devices, and there has been no quantitatively way to assess the impact of these devices on the suction capacity of the cutter suction dredger. This paper summarizes the form of commonly used anti-rock devices, uses CFD method to simulate the different flow field around the suction port between with and without installation of anti-rock devices, computes the hydraulic losses of the dredger when using different anti-rock devices, and determines the coefficients of hydraulic loss of different anti-rock devices. The result shows that the hydraulic loss of net anti-rock device and double ring anti-rock device is larger, and that of ring anti-rock device and staggered anti-rock device is the least. It provides the basic data for the selection of anti-rock devices.

**Key words:** CFD; cutter suction dredger; anti-stone device; hydraulic loss

疏浚施工时常常会遇到底质泥土中存在石块或其他杂物, 采用绞吸挖泥船疏浚时会造成糊堵吸口或泥泵, 极大地影响了施工的连续性。为此在施工过程中通常会在绞刀附近加装防石设施, 减小施工中的堵口和堵泵的机率<sup>[1]</sup>。然而在加装了防石设施后, 防石设施扰乱了吸入泥浆的流态,

从而增加了吸入段泥浆的水力损失, 导致绞吸挖泥船吸入能力的下降, 防石设施对绞吸挖泥船吸入能力影响的文献极少。近些年, CFD 方法广泛应用于航空、海洋、水力等应用领域<sup>[2]</sup>, 可以用来求解流动、热交换、多相流等问题。一些以前只能依靠试验获得的结果, 现在完全可以通过

收稿日期: 2014-01-08

作者简介: 周志强 (1977—), 男, 工程师, 主要从事疏浚与吹填船舶施工工艺的研究工作。

CFD 方法获得。对于绞吸挖泥船通过防石设施造成的水力损失有多大等问题完全可以通过 CFD 模拟。本文采用 CFD 方法对绞吸挖泥船入口部分流场进行模拟，分别模拟了没有防石设施、加装不同形式防石设施的 7 种情况；研究了不同防石设施造成的水力损失，确定了防石设施对绞吸挖泥船吸入能力的影响；最后给出结论。

### 1 绞吸船防石设备

目前在工程中常用的 6 种防石设备（图 1）分别是：普通格栅、马蹄形格栅、犬牙式格栅、单防石环、双防石环、防石网，各防石设备优缺点见表 1。



a) 普通格栅



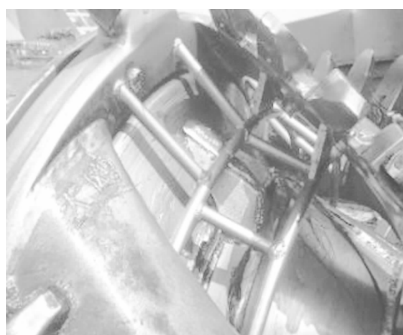
b) 马蹄形格栅



c) 犬牙式格栅



d) 单防石环



e) 双防石环



f) 防石网

图 1 防石设备

表 1 防石设备优缺点

防石设备	优点	缺点
普通格栅	结构简单,焊接快速,防堵泵效果好	黏土、块石容易堵吸口
马蹄形格栅	对黏性土适应性好,杂物容易掏出	突出的弧形板受力不好,容易被挤断
犬牙式格栅	能减小的吸入排挤面积	容易受杂物缠绕,强度较弱,易断裂脱落
单防石环	不易引起糊绞刀,对黏土适应性较好	石块较多时防石效果差,结构强度弱
双防石环	防石效果好,结构相对简单	开挖亚黏土时容易糊绞刀
防石网	结构坚固、防石效果好	结构复杂、易糊堵绞刀

## 2 计算模型

### 2.1 数学模型

本文中采用了雷诺时均  $N-S$  方程<sup>[3]</sup>, 具体形式如下:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \rho \bar{F}_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) \quad (2)$$

式中:  $\bar{u}_i$  为时均速度;  $x_i$  为空间坐标;  $t$  为时间坐标;  $\rho$  为流体的密度;  $\bar{p}$  为时均的压力;  $\bar{F}_i$  为其他外力, 包括: 体积力、升力等;  $\rho \overline{u'_i u'_j}$  为雷诺应力, 具体计算方法如下:

$$\tau'_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} \quad (3)$$

$$-\frac{\tau'_{ij}}{\rho} = \nu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (4)$$

$$\nu_t = \mu_t / \rho \quad (5)$$

$$\mu_t = \rho c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

式中:  $\tau'_{ij}$  为雷诺应力;  $\mu_t$  为湍流黏性系数;  $k$  为湍动能;  $\varepsilon$  为耗散率。  $k$  和  $\varepsilon$  采用下面输运方程求解:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (7)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (c_1 P_k - c_2 \rho \varepsilon) \quad (8)$$

式中:  $P_k$  为湍动能生成项;  $\sigma_k$  和  $\sigma_\varepsilon$  是  $k$  和  $\varepsilon$  的湍流普朗特数;  $c_1$  和  $c_2$  是模型系数<sup>[4]</sup>。

### 2.2 数值模型

根据绞吸船吸口部分结构特点(图 2), 选取绞吸船吸口锥体前部分流体和吸入管内流体部分作为计算域(图 3), 以海水作为计算介质。由于计算域较复杂, 采用了适应性强的四面体网格离散计算域, 计算网格数 100 万左右。边界条件在锥体前面采用速度进口, 周围采用全滑移壁面, 吸管末端采用 Newmann 边界条件, 其他采用无滑移壁面(图 4)。采用 SIMPLEC 方法对速度和压力进行解耦。空间采用二阶迎风格式离散, 计算残差设定为  $10^{-4}$ 。

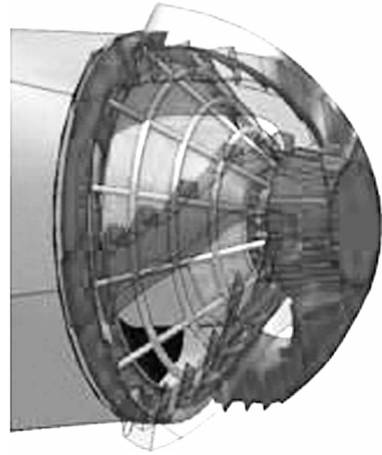


图 2 绞吸船吸口部分结构

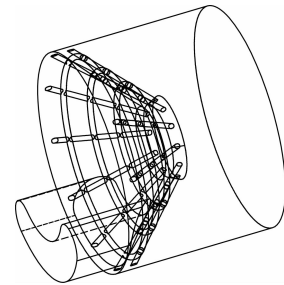


图 3 计算域

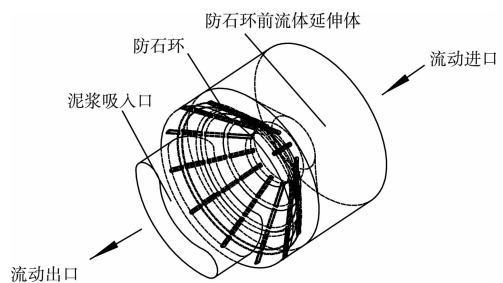


图 4 边界条件

## 3 结果分析

对绞吸船进口流场的 7 种情况进行了模拟, 分别是无防石设备、普通格栅、马蹄形格栅、犬牙式格栅、单防石环、双防石环、防石网, 现取两个典型截面以便后续分析(图 5)。

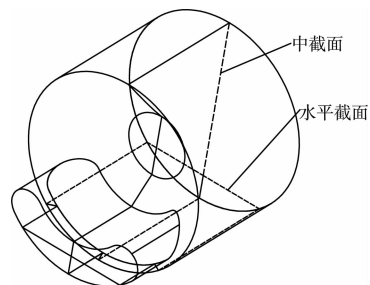
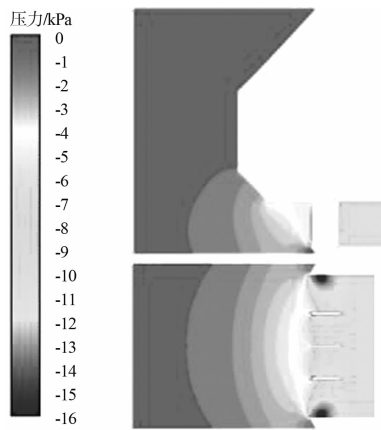


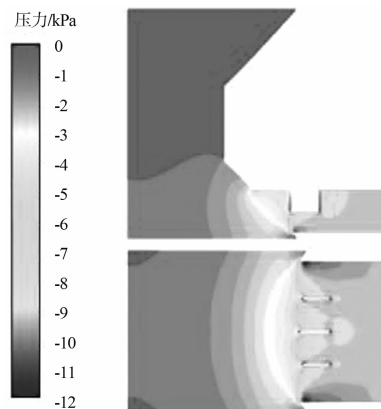
图 5 截面位置

图6为安装不同防石设备绞吸船进口区域在中截面和水平截面上的流场压力分布。从图6可以看到，在流体从锥体前进入吸入管时，过流面积减小使得流体速度增加，压力有较大的下降；在设置了防石设备的计算结果中，防石设备迎流方向都出现了局部高压，这是由于流体冲击防石设备并在防石设备前缘形成驻点造成的，在这些区域会有较大的水力冲击损失；在犬牙式格栅中由于流体冲击面小于普通格栅，在流体经过格栅后压力下降小于普通格栅；在双防石环的计算结果中，防石环结构造成了非常大的局部高压区域，说明这种防石设备引起了更大的流动扰动；单防石环布置在相对流动速度较低的区域，因此引起了较小的局域高压区，对流动的扰动较小。

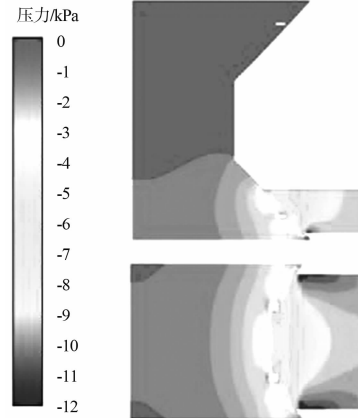
图7为安装不同防石设备绞吸船进口区域在中截面和水平截面上的速度矢量。在装有格栅的两种情况中，由于格栅结构对吸入管内的流体有较大的扰动作用，形成了非常不均匀的速度分布，



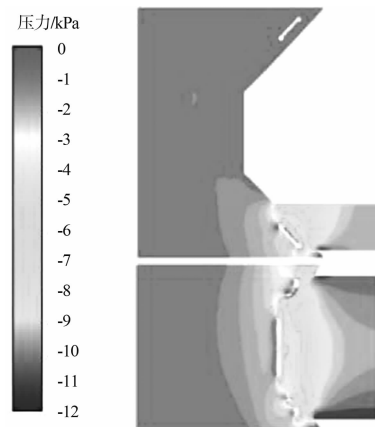
a) 普通格栅



b) 犬牙格栅



c) 单防石环



d) 双防石环

图6 防石设备压力分布

两种格栅的情况中犬牙式格栅对流动的扰动最小；两种防石环结构中，防石环是有一定旋转速度的，因此导致了较大的流场扰动，双防石环对流动的扰动远远大于单防石环的扰动，因此在单防石环能满足拦截石块和杂物的要求时应优先考虑单防石环。

通过流场模拟，统计分析了由于防石设备而造成的水力损失（表2），为了分析结果的普遍性，采用无量纲的局部水力损失系数作为衡量各种防石结构造成水力损失大小的依据。水力损失系数定义如下式：

$$\xi = \frac{\Delta H}{v^2 / (2g)} \quad (9)$$

式中： $\xi$ 为水力损失系数； $v$ 为吸入管出口流速； $g$ 为重力加速度； $\Delta H$ 为由于防石设备而造成的水力损失，即加装防石设备后计算所得的水力损失与无防石设备计算所得水力损失之差。

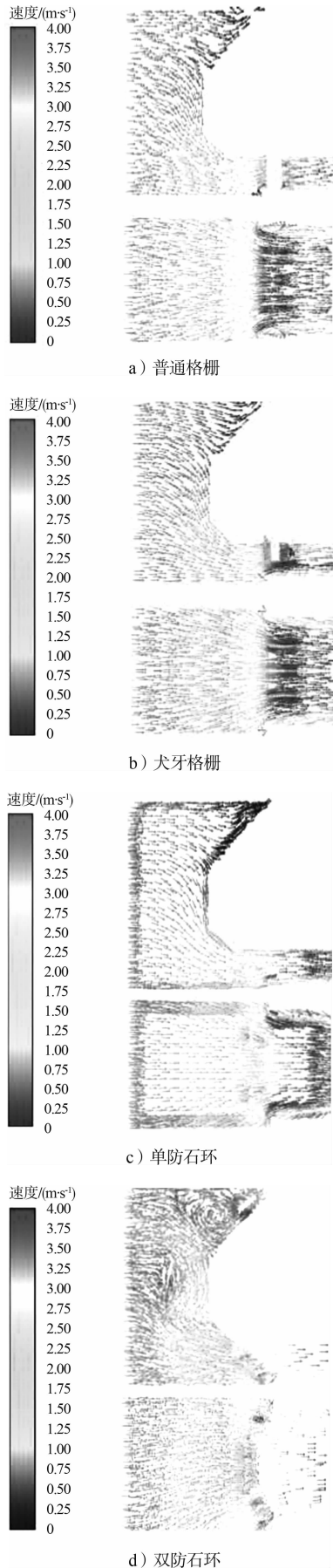


图 7 防石设备速度矢量

从表 2 可以看到犬牙式格栅和单防石环引起的水力损失最小, 防石网引起的水力损失最大。本文的模拟是以介质为海水开展的, 在泥浆中的水力损失可以通过清水到泥浆的水力损失换算方法得到。从表 2 可以看出, 在满足防石要求的情况下, 最好采用单防石环或犬牙式格栅; 若考虑到旋转防石环的拨石效果, 一定要用较密的防石环时, 双防石环优于防石网, 但是两个差别不大。

表 2 防石设备水力损失

防石环类型	双防石环	单防石环	防石网	格栅	马蹄	犬牙
局部阻力系数	0.67	0.15	0.69	0.25	0.27	0.15

#### 4 结论

本文总结了目前常用的防石设备形式, 采用 CFD 方法对加装不同防石设备前后绞吸船吸入口附近流场进行模拟, 计算加装防石设备前后绞吸船的吸入段水力损失, 确定了由于加装防石设备造成的局部水力损失系数。得到如下结论: 1) 格栅形式的防石设备对进入吸入管的流动扰动较小, 犬牙式格栅引起的水力损失最小; 2) 双防石环和防石网对进入吸入管前的流动扰动较大, 都会引起较大的水力损失, 双防石环较防石网引起水力损失较小, 但是差别不大; 3) 从水力损失角度考虑, 推荐优先使用单防石环和犬牙式格栅。

#### 参考文献:

- [1] 高伟. 绞吸船挖岩工艺研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [2] 王福军. 计算流体动力学分析: CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [3] Launder B E, Spalding D B. Lectures in Mathematical Models of Turbulence[M]. London: Academic Press, 1972.
- [4] Farouk B, Guceri S I. Laminar and turbulent natural convection in the annulus between horizontal concentric cylinders[J]. Journal of Heat Transfer: ASME, 1982, 104: 631-636.

(本文编辑 武亚庆)