



耙吸挖泥船艏喷轨迹曲线 及流场特性的数值模拟

尹纪富¹, 王费新¹, 王丽华², 韩政³, 洪国军¹, 张晴波¹

(1. 中交疏浚技术装备国家工程研究中心, 上海 201208; 2. 中交上海航道局有限公司, 上海 200002;
3. 中港疏浚有限公司, 上海 200120)

摘要: 通过 CFD 数值模拟方法模拟了耙吸挖泥船艏喷不同工况时的喷射轨迹曲线及流场特性, 得到了不同工况下的艏喷喷射距离及流场特征, 对比数值结果与施工现场测量结果, 显示数值模拟结果与现场试验结果基本相符, 数值模拟基本可以预测艏喷的喷射距离和流动特征。在此基础上, 对艏喷轨迹线和喷射距离的影响因素进行了分析, 结果表明: 45° 喷角比 30° 喷角喷射距离要远, 但是 30° 喷角有利于回淤与流失量的控制。因此在不同的施工阶段, 可调整喷射角度, 达到最佳施工效果。

关键词: 耙吸挖泥船; 艏喷; 数值模拟

中图分类号: U 615.4; U 616.21

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)11-0029-05

Numerical simulation on the path curve and flow characteristic of bow-spray for trailing suction hopper dredger

YIN Ji-fu¹, WANG Fei-xin¹, WANG Li-hua², HAN Zheng³, HONG Guo-jun¹, ZHANG Qing-bo¹

(1. CCCC National Engineering Research Center of Dredging Technology and Equipment, Shanghai 201208, China;

2. CCCC Shanghai Dredging Co., Ltd., Shanghai 200002, China; 3. CHEC Dredging Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

Abstract: The CFD method is used to simulate the path curve and flow characteristic of bow-spray for trailing suction hopper dredger (TSHD). The spray distance and flow characteristic under different bow-spray conditions are simulated. The numerical simulation results correspond with the construction ones. The results show that the numerical simulation method can accurately predict the path curve of the bow-spray on TSHD and provide reference basis for the construction. On this basis, influencing factors of the spray distance and path are analyzed. The results show that the spray distance of the 45 degree angle is further than that of the 30 degree angle, but it is beneficial to control the sedimentation and loss under the 30 degree angle. Therefore, the best effect can be achieved under the different conditions by adjusting the different injection angles.

Keywords: trailing suction hopper dredger (TSHD); bow-spray; numerical simulation

吹填施工法是耙吸船的主要施工方法之一, 包括艏吹和艏喷两种工艺^[1-2]。艏吹耙吸挖泥船通过连接软管、水上排管和岸排管进行吹填; 带有艏吹装置的耙吸挖泥船可将泥舱内的疏浚土, 通过泵机输送到吹填作业区。根据土质情况, 吹填淤泥粉土时, 吹距相对可以长些; 吹填沙质土时, 吹距相应短些。艏喷是直接由船首喷管处喷出泥

浆作业, 在快速吹填造陆工程初始阶段, 不具备铺设水上管线的条件, 适宜采用艏喷吹填工艺, 但耙吸船的最大喷距制约了艏喷船位控制点的布置。由于海洋造陆具有明显的季风特征, 期间风、浪等恶劣的自然条件极大影响了耙吸挖泥船艏吹管线布设。针对上述难点, 开展耙吸船艏喷施工工艺的相关研究, 以提高作业效率, 实现快速吹

收稿日期: 2016-03-31

作者简介: 尹纪富 (1984—), 男, 博士, 工程师, 从事疏浚设备及船舶水动力学研究。

填造陆^[3]。

由于艖喷施工工艺最重要的限制是喷距，因此有必要对耙吸挖泥船艖喷施工工艺的艖喷轨迹线及其流场特性进行研究分析，通过数值模拟方法对不同喷射工况进行数值分析，得到不同工况情况下艖喷轨迹线及流场特征，预测耙吸挖泥船艖喷时的艖喷距离及流动特征，给现场施工提供较准确的前期保障及参考。

1 艖喷参数分析

耙吸挖泥船艖喷时，对地角度、喷口直径等对挖泥船的产量至关重要。大多数挖泥船喷口的水平角度为 45°，从弹道学的观点来看，这是获得最远喷距的最佳角度^[4]。但水平角度为 45°的喷口在泥浆落地时与地面夹角较大，因此会有较强的冲击力，有一大部分泥浆回流吹填区。喷口的设计通常为内宽外窄的喇叭口形式(图 1)。参数主要有进口直径、出口直径、变径角度、出口端过渡长度、耐磨材料及厚度等。在数值模拟时，不考虑耐磨层的摩擦阻力，默认艖喷口内表面为光滑壁面，进口直径为 1 m，变径角度为 75°，过渡段长度为 0.3 m，出口直径根据计算工况的不同而定。

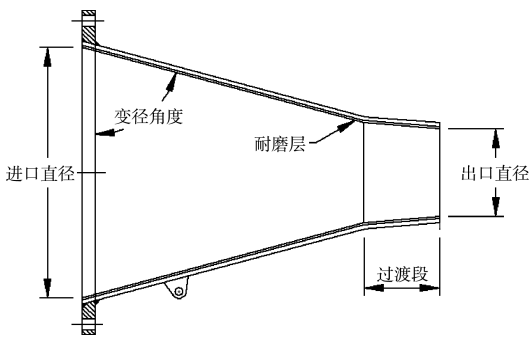


图 1 喷口结构

2 数值模拟方法及模型

目前，常用的可变密度的单一流质多相流模型主要有 Mixture 和 VOF 两种^[5-6]。VOF 模型可用于模拟自由液面流动的数值模拟，Mixture 模型可用于模拟有强烈耦合的各向同性多相流和各相以相同速度运动的多相流，包括多粒子流动和沉降等，因此本文使用 Mixture 模型模拟耙吸挖泥船的

泥浆艖喷过程。

连续性方程为：

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{u}_m) = 0 \tag{1}$$

引入气、汽、液的体积分数 α_g 、 α_v 、 α_l ，在 Mixture 模型中，各相体积分数应满足相容性条件：

$$\alpha_g + \alpha_v + \alpha_l = 1 \tag{2}$$

式中： ρ_m 为混合物密度； \mathbf{u}_m 为流场速度向量。采用标准的两方程模型求解连续性方程。标准 $k-\varepsilon$ 两方程模型的形式如下：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_m k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\alpha_k \mu_t) + G_k + G_b - \rho_m \varepsilon - Y_M + S_k \tag{3}$$

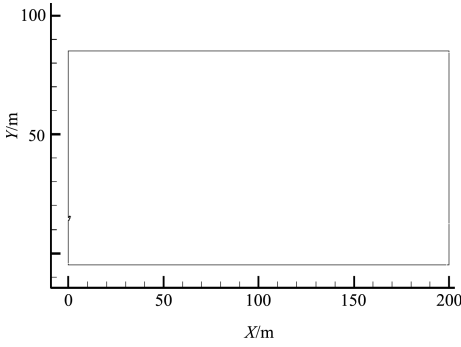
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_m \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_t \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho_m \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \tag{4}$$

式中： G_k 由平均速度梯度引起的湍流动能产生； G_b 由浮力而引发的湍流动能产生； Y_M 为可压缩湍流流动中，振荡膨胀对耗散率的影响； α_k 、 α_ε 分别是 k 、 ε 的负效应 Prandtl 数， $\alpha_k = \alpha_\varepsilon \approx 1.393$ ；模型常数 $C_{1\varepsilon} = 1.44$ ， $C_{2\varepsilon} = 1.92$ ， $C_{3\varepsilon} = \tanh |v/u|$ ，其中 v 为平行于重力场矢量的流速分量， u 为垂直于重力场矢量的流速分量； $C_\mu = 0.09$ 。

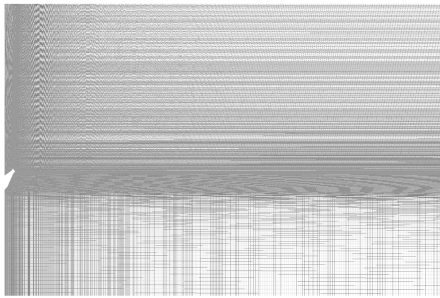
湍流涡黏系数表达式为：

$$\mu_t = \frac{\rho_m C_\mu k^2}{\varepsilon} \tag{5}$$

采用简化的模型进行艖喷流场的数值计算，数值模拟中，流场控制区域见图 2，实际施工时，艖喷口距水面平均高差为 15.7 m，因此艖喷口距离底部边界高度为 15.7 m，平面区域长宽为 200 m × 80 m。上边界和右边界采用的是压力出口边界条件，左边界采用的为对称边界，底部采用的是壁面边界条件，艖喷壁面采用壁面边界条件。艖喷口采用速度入口边界，考虑到实际工程中在艖喷口向外喷射时，底部会有部分水体，因此模型中设置了底部 5 m 深的静水，在数值模拟时采用了 UDF 方法在出口处引入了静压分布和出口处的各相分数分布情况。



a) 计算区域



b) 网格

图 2 数值计算区域及数值网格

网格全部为四边形结构网格, 艏喷口及流动区域网格进行了局部加密, 采用有限体积法离散动量和连续性方程, 压力速度耦合迭代采用 SIMPLE(semi-implicit pressure linked equation)算法, 扩散项采用二阶中心差分格式, 压力采用 PRESTO! 空间离散格式进行离散, 体积分数采用二阶迎风格式。数值模拟时, 每个时间步长 0.005 s, 在数值模拟泥浆艏喷时, 将泥浆浓度设定为 1 250 kg/m³。

3 艏喷轨迹曲线及流场特性分析

根据不同的喷距要求, 在实际施工过程中, 耙吸挖泥船艏喷作业通常采用的泥泵模式有低低模式、低高模式和高高模式 3 种。因此, 在数值模拟时, 根据实船测量结果, 艏喷口出口流速采用实船艏喷口流速, 艏喷口距离水平面高差为 15.7 m, 艏喷口对地倾斜角度为 45°, 分析了低低模式和低高模式下艏喷泥浆时的喷射距离和速度矢量场。

图 3 为低低模式艏喷清水和泥浆时的数值模拟喷射距离。结果显示: 艏喷清水时, 喷射高度最高点距离地面约为 35 m, 喷射距离为 100 m;

假设泥浆为均质, 密度为 1 250 kg/m³, 泥浆喷射的最高点距离地面约为 32.5 m, 喷射距离为 89 m。艏喷泥浆与清水相比, 喷射距离有所减小。

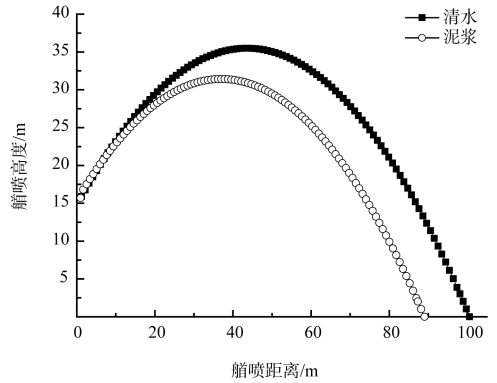
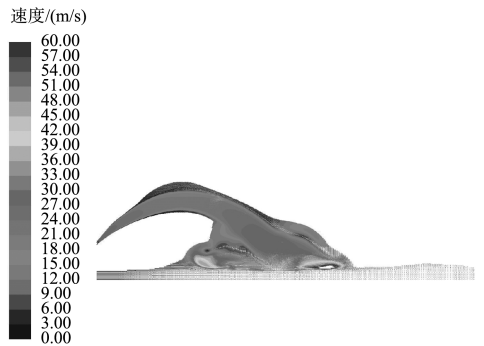
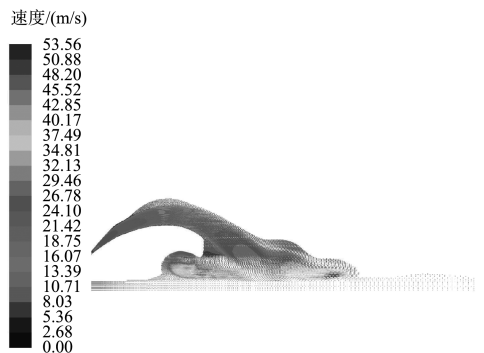


图 3 低低模式艏喷清水和泥浆时的喷射距离

图 4 为低低模式艏喷清水和泥浆时的速度场矢量, 为流体到达喷射区域后的情况。结果表明, 艏喷清水和泥浆时速度矢量场略有不同: 当艏喷清水时, 流体落地后在落地区域有所积聚, 并未向喷射区域和回流区域快速延伸; 当艏喷为泥浆时, 浆体在落地后, 一部分快速向喷射区域扩散, 另外也有部分流向回流区。



a) 清水



b) 泥浆

图 4 低低模式艏喷清水和泥浆时的速度矢量

表1给出了不同的泥泵模式下，船喷清水、泥浆的数值模拟结果和施工现场通过全站仪测量的喷距的结果对比。数值模拟结果与全站仪测量结果最大误差为4.8%，最小误差为0.2%，数值模拟结果与现场试验结果基本相符，数值模拟基本可以预测船喷的喷射距离和流动特征。

表1 不同工况船喷测试情况

浆体情况	泥泵模式	数值模拟结果/m	全站仪测量喷距/m	误差分析/%
清水	低低	100.59	99.2	1.3
	低高	161.41	155.5	3.7
泥浆 (1 250 kg/m ³)	低低	89.04	84.7	4.8
	低高	146.24	146.6	0.2

4 船喷轨迹线及喷距影响因素分析

4.1 不同喷射角度的对比

图5为低低模式不同角度时的船喷喷射距离对比。喷射角度为45°时的喷射距离为100 m，喷射角度为30°时喷射距离约87 m。当船喷口倾斜角度为45°时，船喷轨迹线中抛物线的最高点要比30°高得多，喷射距离也比30°时要远。

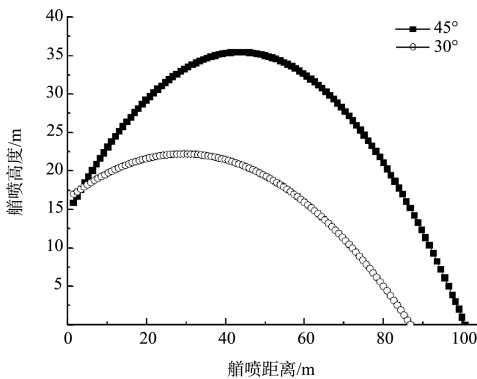


图5 低低模式不同船喷角度的船喷距离对比

图6为低低模式不同船喷角度时的速度矢量场对比。当船喷角度为45°时，流体落地后在落地区域有所积聚，并未向喷射区域和回流区域快速延伸，但是可以看出有较大一部分流体向回流区内流动，而且向吹填区内扩散的范围较小；当船喷角度为30°时，流体落地后有明显的向吹填区扩散的趋势，且向回流区扩散的范围也较小。结合图5中喷射距离和轨迹线的情况，当喷射角度为45°时流体落地时与地面的夹角约为

67°，而当喷射角度为30°时的流体落地时与地面夹角约为54°；当流体落地时，30°时水平方向向吹填区流动的速度分量要大于45°夹角时，所以在45°夹角时会在落地区积聚，而30°时向吹填区流动。

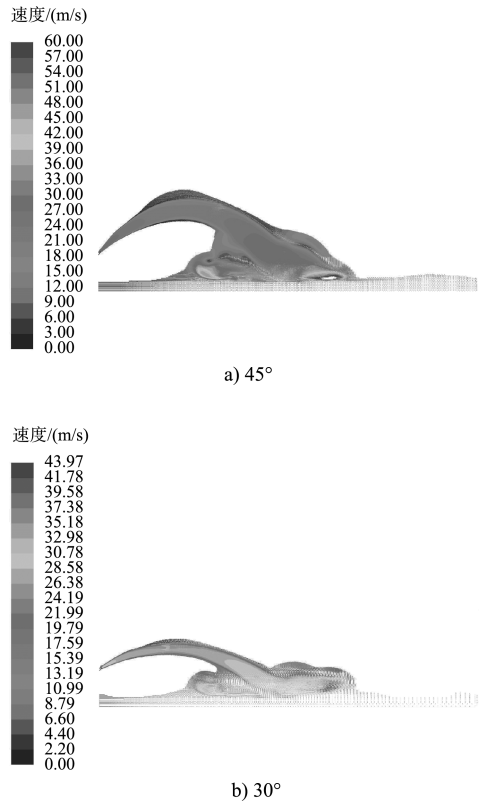


图6 低低模式不同角度速度矢量

因此，若从喷射距离方面看，喷角为45°时喷射距离要大于30°喷角，但是从回淤控制和流失量方面看，喷射角度为30°时更加有利于回淤与流失量控制，在实际施工过程中，可根据不同的施工阶段的特点，选择合适的船喷角度进行施工。

4.2 不同喷口直径的对比

实际施工工况下，出口直径的变更可能导致管路摩阻及泥泵工作点的变化，进而泥泵流量及船喷口流速也随之改变。此处仅考虑喷口直径的变更对船喷轨迹线及喷距的影响，暂不考虑喷口直径的变更导致的船喷口流速的影响，即采用相同的出口速度来计算。喷射角度为45°，喷口直径分别为0.35、0.40、0.45 m。

图7为不同喷口直径下的船喷距离对比。当

直径为 0.45 m 时, 喷口喷出的流体最高点距离地面最高。喷射距离方面, 直径为 0.35 m 时喷射距离为 89 m, 直径为 0.40 m 时喷射距离为 95 m, 直径为 0.45 m 时喷射距离约为 100 m, 因此在相同的出口流速时, 在计算工况范围内, 随着喷口直径的增加喷射距离逐渐增大。

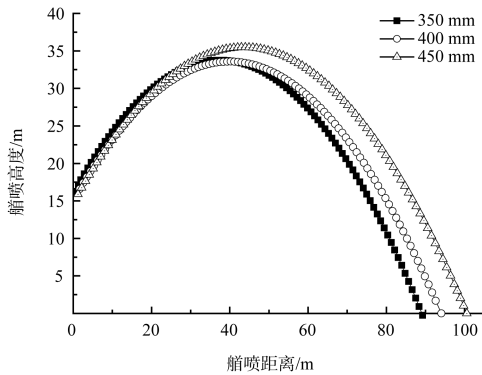
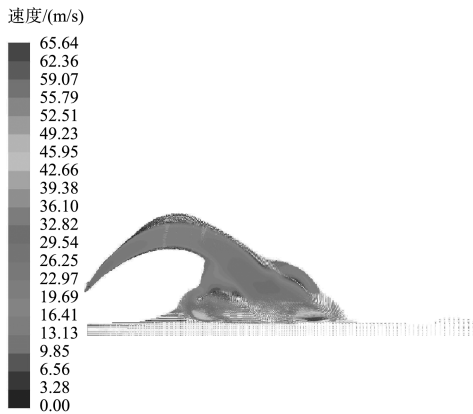
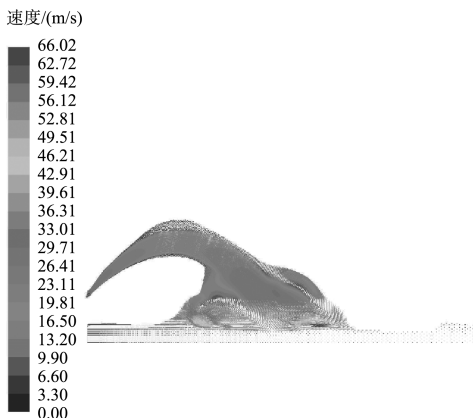


图 7 不同艏喷口直径的艏喷距离对比

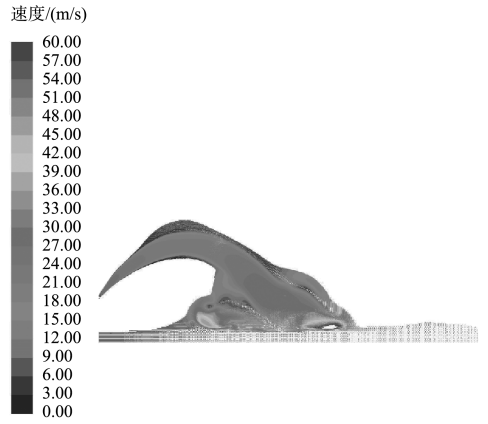
图 8 为不同艏喷口直径时的速度矢量。喷口直径对艏喷流场特性影响较小, 在不同喷口直径时, 速度矢量场的特性基本相似。



a) 0.35 m



b) 0.40 m



c) 0.45 m

图 8 不同艏喷口直径的速度矢量

5 结论

1) 泥泵模式为低低模式时, 艏喷喷射泥浆时喷射距离比喷射清水时的喷射距离有所减小, 且喷射泥浆时有较明显的回淤和扩散迹象。对比数值结果与施工现场测量结果, 显示数值模拟结果与现场试验结果基本相符, 数值模拟基本可以预测艏喷的喷射距离和流动特征。

2) 采用 45° 喷角比采用 30° 喷角的喷射距离要远, 但 30° 喷角有利于回淤与流失量控制, 因此在不同的施工阶段, 可以调整不同的喷射角度, 达到最佳的施工效果。相同喷口流速条件下, 随着喷口直径的增加, 喷射距离逐渐增大, 但实际施工中, 喷口直径的变更, 会导致管路流量及喷口流速的变更, 甚至影响施工产量, 需结合耙吸船艏喷泥泵管路系统工作参数计算结果综合评判。

参考文献:

- [1] 高锐, 孟德宝. 疏浚工程施工方法[J]. 黑龙江水利科技, 2006(4): 80-82.
- [2] 程志东. 浅谈耙吸挖泥船施工工艺[J]. 中国水运, 2012(12): 142-143.
- [3] 李国江, 王会禹. 自航耙吸式挖泥船艏吹施工工艺及效益分析[J]. 中国港湾建设, 2009(5): 42-44.
- [4] 德米特里耶夫斯基 A A, 雷申科 Л И, 波哥吉斯托夫 C C. 外弹道学[M]. 韩子鹏, 译. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [5] Mikko M, Veikko T, Sirpa K. On the mixture model for multiphase flow[M]. Finland: VTT Publications, 1996.
- [6] Hirt C W, Nicholls B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries[J]. Comput Phys, 1981, 39: 201-225.