



气泡幕拦浑技术在港池疏浚中的应用*

计 焯¹, 曹文斌¹, 林宝臻¹, 陈润浩¹, 伍贤熙², 黄筱云³, 黄伦超³

(1. 广州打捞局, 广东广州 510290; 2. 江西省港航建设投资集团有限公司, 江西南昌 330008;
3. 长沙理工大学 水利与环境工程学院, 湖南长沙 410114)

摘要: 为指导气泡幕拦浑实践, 采用理论推导, 给出气泡幕拦浑所需单宽曝气量的计算公式, 以及气泡幕开孔管径尺寸的计算方法, 将新的计算公式和方法应用于宜春樟树港区河西作业区综合码头的港池疏浚工程的气泡幕拦浑作业, 并总结气泡幕拦浑施工工艺。结果表明: 气泡幕具备良好的拦浑效果, 但气泡幕拦浑最佳单宽曝气量小于理论值。总体来看, 气泡幕装置结构简单、安装方便, 拦浑效果良好, 且不妨碍船舶正常通行, 与防污帘组合使用阻拦悬沙扩散效果更佳。

关键词: 疏浚; 气泡幕; 拦浑; 理论推导; 应用

中图分类号: U653.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)07-0252-05

Application of air bubble curtain technology in harbor basin dredging

Ji Huan¹, CAO Wenbin¹, LIN Baozhen¹, CHEN Runhao¹, WU Xianxi², HUANG Xiaoyun³, HUANG Lunchao³

(1. Salvage Bureau of Guangzhou, Guangzhou 510290, China;

2. Jiangxi Provincial Port & Waterway Construction Investment Group Co., Ltd., Nanchang 330008, China;

3. School of Hydraulic & Environmental Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: In order to guide the practical application of sediment interception using a bubble curtain, we use a theoretical derivation to provide calculation formulas for the required aeration rate per unit width and a method for calculating the diameter of the bubble curtain's perforated pipe, apply these new calculation formulas and methods to the sediment interception operation for the harbor basin dredging of the comprehensive terminal project in the Hexi operation area of Zhangshu Port in Yichun Harbor, and summarize a construction process for the sediment interception with the bubble curtain. The results show that the bubble curtain has a good sediment interception effect, but the optimal aeration rate per unit width for sediment interception is lower than the theoretical value. Overall, the bubble curtain device has a simple structure, easy installation, good sediment interception effect, and does not hinder normal vessel passage. Combined with silt curtains to prevent the spread of suspended sediment, it works even better.

Keywords: dredging; bubble curtain; sediment interception; theoretical derivation; application

港池和航道疏浚会造成泥沙悬扬, 部分悬沙会在疏浚作业区周围形成高浓度浑水, 并在风流以及重力作用下向外扩散^[1]。若底泥中含有重金属元素, 扩散的悬沙会对周围水体环境造成威胁^[2]。为了控制悬沙扩散范围, 减小疏浚对环境的影响, 常采用的防护措施是布置防污帘^[3]。防

污帘的作用原理是通过帘布阻碍疏浚悬浮物运动, 降低悬浮颗粒的扩散距离^[4]。帘布依靠浮子等设施固定于水中, 会阻碍船舶航行。因此, 防污帘应用于繁忙航道疏浚时, 其可操作性将受到限制^[5]。在 20 世纪 60 年代, 国外学者便提出气泡幕拦浑的设想。近年来, 国内研究者开展气泡幕

收稿日期: 2023-11-21

*基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (52171245)

作者简介: 计焯 (1983—), 男, 高级工程师, 从事水运工程施工与管理。

拦浑的物理试验^[6]和数值模拟^[7], 试验结果表明, 气泡幕能够减缓悬沙扩散速度, 有效控制污染扩散。至于施工现场试验方面, 国内外学者开展气泡幕拦浑研究, 结果表明气泡幕具备良好的防悬沙扩散的效果^[8-9]。不过, 到目前为止, 气泡幕拦浑的试验和实际应用案例还很少, 未形成相应的施工工艺, 无法指导具体的工程实践。

本文通过理论分析, 提出气泡幕拦浑所需单宽曝气量以及开孔管径的计算方法, 并以宜春港樟树港区河西作业区综合码头的港池疏浚工程为依托, 开展气泡幕拦浑实践, 总结气泡幕拦浑施工工艺, 为其他类似疏浚工程防污扩散提供借鉴。

1 气泡幕拦浑机理

气泡幕是由水底开孔管曝气形成的气泡墙。在气泡幕作用下, 周围水体伴随大量的气泡向上运动, 到达水面后, 则向两侧流动, 形成表层水平流, 根据 Bulson^[10]的试验结果, 水平流厚度约为 0.28 倍水深。持续曝气将在气泡幕两侧形成垂向环流。气泡幕的流场见图 1。采用气泡幕阻止悬沙颗粒扩散时, 泥沙将在环流作用下被限制在浑水一侧。除拦浑外, 利用水下曝气产生的水流, 气泡幕也可用于水库消层、海船闸防咸、消波、拦油等多个方面。

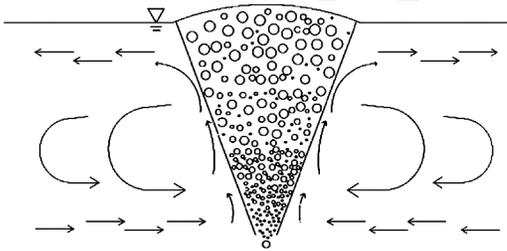


图 1 气泡幕流场

气泡幕拦浑效果与浑水运动速度、气泡幕产生的气泡羽流强度有关。考虑浑水以密度流的形式运动, 密度流的水舌移动速度 v_M 的计算公式为^[11]:

$$v_M = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta\rho}{\rho} gh \right)^{1/2} \quad (1)$$

式中: ρ 为清水密度, $\Delta\rho$ 为清浑水密度差, h 为水深。

浑水流量 q_M 的计算公式为:

$$q_M = v_M h / 2 \quad (2)$$

清浑水的密度差可认为近似浑水浓度 c_M , 则有:

$$q_M = \frac{h}{4} \left(\frac{c_M}{\rho} gh \right)^{1/2} \quad (3)$$

根据 Abraham 等气泡羽流理论^[12], 羽流向上速度 w 以开孔管中轴为中心呈高斯分布, 即:

$$w = w_m e^{-32(x/z)^2} \quad (4)$$

式中: w_m 为气泡幕中心垂向流速, x 、 z 为笛卡尔坐标。在浅水条件下, 其计算公式为:

$$w_m = 1.8 (g q_a)^{1/3} \quad (5)$$

式中: q_a 为气泡幕单宽曝气量。任一水平断面上垂向流量的计算公式为:

$$q_w = 2 \int_0^{+\infty} w dx = 0.31 w_m z \quad (6)$$

由于水面的存在, 气泡羽流将发生偏转。在水平流范围内, 垂向流量随深度增加而加大; 表层水平流以下, 垂向流量则随深度增加而减小。最大垂向流量出现在水平流底边界所在水平面上。

假定气泡幕中线两侧羽流互不掺混。当浑水经过气泡幕时, 若浑水流量小于单侧气泡羽流最大流量, 浑水将不会透过气泡幕向外扩散。因此, 阻止浑水所需的单宽供气量的计算公式为:

$$q_a = \left[\frac{5}{4} \left(\frac{c_M h}{\rho} \right)^{1/2} g^{1/6} \right]^3 \quad (7)$$

2 均匀开孔管曝气理论

假定曝气管为顶部均匀开孔的圆管, 一端开口, 一端封闭。曝气管长为 L , 半径为 R , 开孔半径为 r , 孔间距为 l , 开孔数量为 n 。靠近封闭段的开孔的曝气量 q_n 的计算公式为:

$$q_n = q_a l = C_d \pi r^2 \sqrt{2\Delta p / \rho_a} \quad (8)$$

式中: C_d 为系数, 取 0.6; Δp 为孔口内外压力差; ρ_a 为空气密度。

相邻两孔之间压力损失 Δp_f 的计算公式为:

$$\Delta p_f = \frac{\lambda l Q_i^2 \rho_a}{4 \pi^2 R^5} \quad (9)$$

式中： λ 为沿程压力损失系数，可采用伯拉修斯公式计算； Q_i 为第 $i-1$ 孔和第 i 孔之间的流量。故有：

$$\begin{cases} Q_{i-1} = Q_i + q_i \\ Q_n = q_n \end{cases} \quad (10)$$

式中： q_i 为第 i 孔的曝气量。

靠近曝气管末端的开孔压力 p_n 的计算公式为：

$$p_n = \rho gh + \frac{\rho_a}{2} \left(\frac{q_a l}{C_d \pi r^2} \right)^2 \quad (11)$$

第 i 孔的压力 p_i 为：

$$p_i = p_{i+1} + \Delta p_f \quad (12)$$

曝气管进口压力 p_c 为：

$$p_c = p_1 + \Delta p_f \quad (13)$$

此时，曝气管总供气量 Q_c 为：

$$Q_c = \sum_{i=1}^n q_i \quad (14)$$

3 气泡幕拦浑工艺流程

疏浚中防悬沙颗粒扩散的气泡幕工艺流程如图 2 所示。在施工准备阶段，获取现场水深，采集现场泥沙资料，得到浊度与悬沙浓度关系曲线；确定气泡幕布置方案包括根据疏浚施工位置和面积，确定拦浑方案，包括气泡幕拦浑或气泡幕与防污帘组合方案，确定气泡幕布置的位置和长度；在估算气泡幕理论单宽曝气量阶段，先用挖泥船进行试挖，采用便携式浊度仪测量挖泥船周围浑水浊度，根据浊度与浓度关系曲线，获得浑水浓度，再依据现场水深和浑水泥沙浓度，确定防细颗粒泥沙扩散的理论单宽曝气量；确定曝气管的孔径和孔间距，孔径一般取 2~4 mm，孔间距一般取 0.2~0.4 m，再根据孔径、孔间距、曝气管长度以及空气压缩机的额定输出压强（一般为 0.8 MPa），确定曝气管内径以及歧管出口尺寸；根据曝气管内径和长度要求购置耐压橡胶管，并在橡胶管上开孔，购置曝气管阀门、流量计和压力表，制作气泡幕歧管；根据气泡幕发生器长度和单宽曝气

量要求，确定总曝气量，租用多台空气压缩机，以满足供气要求；将流量计、阀门依次连接在歧管出口端，采用连接管将歧管和曝气管相连，曝气管上间隔 5 m 绑定沉块，并由小艇搬运至预定位置，通过手持全球定位系统 (GPS) 定位后沉放，歧管和空气压缩机则安放在安全位置；在挖泥船开挖前，开启气泡幕阀门，按设定流量供气；疏浚完毕后，关闭阀门，移除气泡幕。

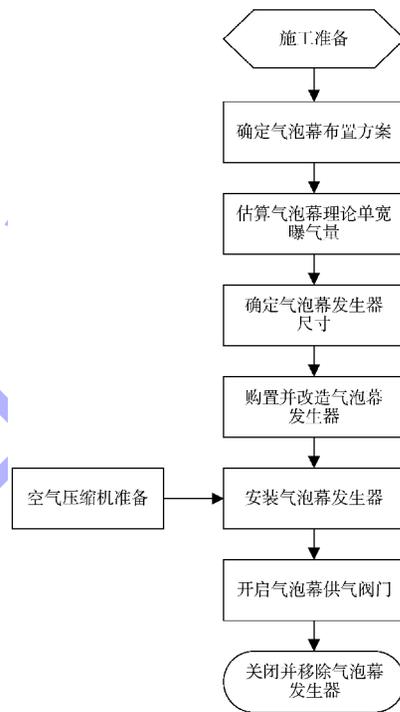


图 2 工艺流程

4 气泡幕拦浑的应用

4.1 平面布置

宜春港樟树港区河西作业区综合码头工程新建 15 个 1 000 吨级泊位，包括 3 个集装箱泊位、4 个件杂货泊位和 8 个散货泊位。码头总长度为 1 494 m，结构为高桩梁板式。码头桩基采用筑岛平台进行施工。为了加快施工进度、节约施工成本，码头框架结构也利用筑岛平台进行浇筑。浇筑完毕后，进行港池和岸坡开挖。码头位于龙头山枢纽库区内，水流较缓，现场测得的表层流速小于 0.2 m/s。

港池开挖采用铲斗挖泥船，顺码头前沿方向施工，疏浚土由泥驳运输到抛泥区抛泥。为减少

港池开挖悬沙扩散, 当施工到某一区域时, 在该区域周边采用气泡幕与防污帘的组合形式^[13]进行防污扩散, 见图3。在泥驳进出通道部位采用气泡幕, 其他部位采用防污帘, 其中防污帘长 80 m+40 m, 气泡幕长 40 m。



图3 组合式拦浑平面布置

4.2 水体浊度测量

现场浑水浊度通过便携式浊度仪测量。为了获得浑水中悬沙浓度, 需要建立浊度与浓度之间的联系。首先, 收集现场沙样, 获取底沙级配; 按照级配配制试验沙, 并与水混合, 获得不同浓度的浑水; 测量不同浓度浑水的浊度值, 建立浊度-浓度关系曲线。现场泥沙的中值粒径为 0.45 mm, 分选度为 2。根据室内试验获得的浊度-浓度关系曲线公式为:

$$T_u = 36.45c_M \quad (15)$$

式中: T_u 为浊度, NTU; c_M 为浑水浓度, g/L。

挖泥船作业时, 测量其铲斗周围多个位置浑水浊度垂向分布, 得到该位置上水深平均的浊度值, 通过浊度-浓度曲线获得相应的浓度, 再通过空间平均确定挖泥船施工时产生的浑水浓度值。在距挖泥船 5 m 范围内, 最大浊度值为 268 NTU。

4.3 气泡幕组成与操作

气泡幕装置由曝气管、连接管、歧管、阀门、流量计与空气压缩机等组成。曝气管通过橡胶管开孔制成, 橡胶管径为 10 cm, 孔径约为 3 mm, 孔间距为 0.3 m。曝气管一端通过连接管与歧管相连, 另一端封闭。歧管由圆形钢管制作, 其上布置多个与空气压缩机相连的进气口和压力表, 出口处依次安装流量计和阀门, 见图4。曝气管每隔 5 m 绑定沉块, 防止曝气时橡胶管上浮。



图4 气泡幕歧管

实际操作时, 先打开空气压缩机, 再开启歧管进口阀门, 待歧管内压力上升平稳后, 缓慢打开曝气管阀门, 调整曝气管的总供气量。

4.4 气泡幕防污效果分析

挖泥船开挖时, 水面风速约为 0.5 m/s, 浑水浊度随到开挖位置的距离增加而减小, 且呈现出上游低、下游高的特点, 数据见表1。可以看出, 在距开挖位置 30 m 后, 上、下游水体浊度几乎保持一致, 在距开挖位置 5~10 m 处, 水体平均浊度约为 245 NTU, 对应泥沙颗粒浓度为 6.6 g/L。

表1 挖泥船上、下游浑水浊度分布

距离/m	浊度/NTU	距离/m	浊度/NTU
-5	49.3	5	276.8
-10	45.0	10	216.7
-15	42.6	15	88.6
-23	31.3	23	50.2
-30	23.2	27	51.4
-34	29.8	30	21.8
-40	26.4	34	29.4
-	-	40	28.6

注: 距离为负值表示上游, 正值表示下游。

气泡幕开启后, 挖泥船附近悬沙的平面分布状态见图5。气泡幕距开挖位置约 8 m, 平均水深约为 2 m。根据式(7)可得, 气泡幕拦浑的理论单宽供气量为 9 L/(s·m)。不同单宽供气量下气泡幕内外 1 m 处的浑水浓度见表2。在气泡幕水平流的作用下, 气泡幕外侧浑水浓度明显减小。其中, 当单宽曝气量为 0.64 L/(s·m) 时, 气泡幕外侧浓度仅为气泡幕关闭时的 1/20, 即使单宽曝气量达到 3.2 L/(s·m), 气泡幕外侧浓度也只有气泡幕关

闭时的1/3。当气泡幕单宽供气量较小时,气泡幕两侧泥沙浓度差随单宽供气量增加而增大。单宽曝气量为 $1.3 \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m})$ 时,最大浓度差为 $1.24 \text{ g}/\text{L}$ 。但是,单宽曝气量继续增加,气泡羽流紊动特征变强,甚至发生摆动^[14],泥沙颗粒易在紊流作用下穿过气泡幕进入下游,故当单宽供气量达到 $3.2 \text{ L}/(\text{s}\cdot\text{m})$ 时,气泡幕两侧的浓度差减小到 $0.26 \text{ g}/\text{L}$ 。因此,若采用理论单宽供气量拦浑,其效果不会更好。根据结果,建议气泡幕拦浑的最佳单宽曝气量取理论值的1/15。



图5 气泡幕拦浑效果

表2 不同单宽供气量下气泡幕内外侧1 m处的浑水浓度

单宽供气量/ ($\text{L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$)	内侧浑水浓度/ ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	外侧浑水浓度/ ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	浓度差/ ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)
0.56	0.43	0.32	0.11
0.64	0.62	0.29	0.33
0.73	1.33	0.51	0.82
1.10	1.87	0.98	0.89
1.30	2.14	0.90	1.24
3.20	2.36	2.10	0.26

5 结论

1) 气泡幕结构简单、安装方便,具备良好的拦浑效果,与防污帘组合使用,防悬沙扩散的效果更好。

2) 与防污帘相比较,气泡幕不妨碍船舶航行,适用于河道、港口疏浚工程,具有较高的推广应用价值。

3) 从应用情况来看,气泡幕在拦浑最佳效果时的供气量与理论单宽供气量并不一致。因此,建议通过技术攻关,逐步完善气泡幕防悬沙扩散工艺流程与技术。

参考文献:

- [1] 吴修广,季大闰,史英标,等.港池和航道疏浚过程中悬浮泥沙扩散输移的数值模拟[J].水运工程,2006(8):87-91.
- [2] 胡红兵,吴中乔,高辰龙,等.长江航道疏浚土潜在的健康风险[J].水运工程,2018(1):45-49.
- [3] 王俊杰,陈河元.防污帘在吹填施工中的应用研究[J].珠江水运,2022(19):102-104.
- [4] 韦作仪.土工布防污帘环境保护措施在沿海航道疏浚工程中的应用[J].西部交通科技,2019(11):172-174,177.
- [5] 李智,陈林,陈熙宇,等.水流作用下气泡帘的形成及防悬浮物扩散特性[J].人民长江,2019,50(9):146-152.
- [6] 常聪聪,翟建国,黄筱云,等.气泡帷幕拦浑效率试验研究[J].海岸工程,2021,40(3):196-205.
- [7] 李智,陈林,陈熙宇,等.水流作用下气泡帘的形成及防悬浮物扩散特性[J].人民长江,2019,50(9):146-152.
- [8] CUTRONEO L, GOOT F V D, ROELS A, et al. A check on the efficiency of an air bubble screen using acoustic measurements and an artificial tracer[J]. Journal of soils and sediments, 2014, 14(9): 1626-1637.
- [9] CHENG Y X, ZHAO N, ZHANG K D, et al. Research on the plume stability of air bubble curtains under low transverse flow velocity environment in dredging engineering[J]. Ocean engineering, 2021, 232: 109133.
- [10] BULSON P S. The theory and design of bubble breakwaters[C]//O'BRIEN M P. Proceedings of the 11th International Conference on Coastal Engineering. Reston: ASCE, 1968: 995-1015.
- [11] ABRAHAM G, BURGH P V D. Pneumatic reduction of salt intrusion through locks[J]. Journal of the hydraulics division, 1964, 90(1): 83-119.
- [12] 翟建国,刘庆茶,黄筱云,等.一种环保疏浚气幕帘的供气方法与系统:202010228858.9[P].2020-03-17.
- [13] 彭剑锋,曹文斌,柳恒,等.一种组合式拦浑屏障:202321355601.5[P].2023-05-30.
- [14] 程以炫,董恒瑞,闫睿奎,等.气泡羽流摆动特性及附壁效应研究[J].高校化学工程学报,2020,34(4):904-911.

(本文编辑 王聰)