

# 气动冲沙技术 在新沂河海口枢纽挡潮闸的应用

陈 犇<sup>1,2</sup>, 丁 磊<sup>1</sup>, 丁 跃<sup>3</sup>, 杨 帆<sup>1</sup>, 杨啸宇<sup>1</sup>, 胡志浪<sup>3</sup>

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210024; 2. 河海大学 港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098;

3. 江苏省淮沭新河管理处, 江苏 淮安 223005)

**摘要:**近年来,沿海挡潮闸闸下泥沙淤积问题较为突出,传统清淤方法对受季节、现场条件等众多因素影响,清淤效果有待提高。针对新沂河海口枢纽挡潮闸闸下淤积问题,采用了气动冲沙减淤防淤技术进行现场试验研究,并进行效果评估。结果表明:排气气压和喷嘴角度是影响闸下减淤效果的重要因素,排气气压与冲沙坑体积成正比;喷嘴角度 $90^{\circ}$ 适用于清淤范围小且淤积深度较深的情况;喷嘴角度 $45^{\circ}$ 适用于清淤范围大且淤积强度中等的情况。综合考虑防淤效果和经济成本,2 mm喷嘴孔径更适用于日常防淤工作。

**关键词:**气动冲沙技术; 海口枢纽挡潮闸; 泥沙淤积; 防淤减淤

中图分类号:TV15

文献标识码:B

文章编号:1007-7839(2023)11-0008-0005

## Application of pneumatic anti-silting technology in the tide gates of Xinyi River estuary hub

CHEN Ben<sup>1,2</sup>, DING Lei<sup>1</sup>, DING Yue<sup>3</sup>, YANG Fan<sup>1</sup>, YANG Xiaoyu<sup>1</sup>, HU Zhilang<sup>3</sup>

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China;

2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Jiangsu Huaishu Xinhe Management Office, Huai'an 223005, China)

**Abstract:** In recent years, the problem of sediment deposition under the coastal tidal gate is more prominent. The traditional dredging method is affected by many factors such as season and site conditions, and the dredging effect needs to be improved. Aiming at the problem of siltation under the tide gates of Xinyi River estuary hub, the pneumatic anti-silting and silt reduction technology was used to carry out field test research and evaluate the effect. The results show that the exhaust gas pressure and nozzle angle are important factors affecting the effect of sediment reduction under the gate, and the exhaust gas pressure is positively correlated with the volume of the scour hole. The nozzle angle of  $90^{\circ}$  is suitable for the case of small dredging range and deep siltation depth. The nozzle angle of  $45^{\circ}$  is suitable for the case of large dredging range and medium siltation intensity. Considering the anti-silting effect and economic cost, 2mm nozzle aperture is more suitable for daily anti-silting work.

**Key words:** pneumatic anti-silting technology; tide gates of the estuary hub; sediment accumulation; anti-silting and silt reduction

收稿日期:2023-07-11

基金项目:国家自然科学基金(U2243241);江苏省水利科技项目(2020002,2021025);南京水利科学研究院创新团队基金(Y220013)

作者简介:陈犇(1997—),男,博士研究生,主要从事平原河网水环境等方面研究。E-mail:220203020002@hhu.edu.cn

通信作者:丁磊(1993—),男,工程师,博士研究生,主要从事河口水动力学研究。E-mail:lding@nhri.cn

沿海挡潮闸是中国沿海省份重要的水利工程,在沿海地区防潮抗台、御卤蓄淡、排涝泄洪等方面发挥了重要作用。挡潮闸建成后,河口潮流条件发生改变,潮波变形,落潮流速降低,水流挟沙能力和含沙量的不对称,随涨潮流上溯的悬沙在闸下落淤,导致闸下河道发生持续性淤积<sup>[1]</sup>。淤泥质海岸的沿海挡潮闸闸下泥沙淤积问题尤为突出<sup>[2]</sup>。其中超过80%的中大型挡潮闸建在苏北海岸、渤海湾及珠江口等淤泥质河口。在江苏入海河口建有约60座挡潮闸,均存在不同程度的淤积问题,近1/3挡潮闸下淤积严重。

近年来,许多学者对沿海挡潮闸淤积问题进行了研究,朱建英等<sup>[3]</sup>通过港道监测及排水量资料分析里下河地区各港道冲淤规律,分析成果为改进四大港闸调水冲淤运行、尽可能减轻淤积提供技术依据;许德智等<sup>[4]</sup>研究表明拖耙清淤具有效率高、费用低的特点;黄广勇等<sup>[5]</sup>分析了盐城四港港道入海径流量与闸下港闸冲、淤关系,得出汛期以冲为主、非汛期以淤为主的特点。采用传统的机械清淤或纳潮清淤的传统方法解决挡潮闸闸下淤积问题,传统机械清淤当河床底部异物多时,易堵塞耙齿间空隙,使耙齿无法深入土层。而纳潮清淤受上游水动力条件、土体淤积强度和现场条件因素影响,枯季清淤效果较差。因此,在河口区域自然水动力基础上,学者开始针对罗肇森提出的气动冲沙法进行物理及数值模型试验来探讨减淤的实际效果;唐豪<sup>[6]</sup>基于物理模型试验和数值模型试验数据,对气体引起的缓流水域的流场和湍流动能变化以及泥沙运动进行了研究,发现泥沙输移效率与水流流速和进口流速呈正相关的关系;李海泉<sup>[7]</sup>对连申线盐灌船闸下游武障河模型试验,采用气动冲沙的方式对引航道出口区段进行减淤,试验发现冲刷后断面能冲刷至-4.0~-5.0 m;徐进超等<sup>[8]</sup>利用Fluent软件对沉沙池的冲淤情况进行模拟,发现了在相同条件下采用水射流方式的冲刷影响范围较大,但采用气动冲沙的方法清淤效率更高。2020年南京水利科学研究院在黄河小浪底水库砗水河口拦门沙采用固定式气动减淤装备进行了减淤技术现场示范,试验期间通过输送气体使床面附近水体形成强紊动,试验点附近含沙量增加明显,河床高程有所降低,证明了气动冲沙减淤防淤技术不仅可以增加水体含沙量,还可以改变局部河势,提高河道输沙能力<sup>[9]</sup>。

针对新沂河口枢纽挡潮闸闸下淤积问题,拟采用自主研发的气动冲沙减淤防淤技术在新沂河

海口枢纽挡潮闸进行现场试验,并进行效果评估,为新沂河口枢纽未来减淤防淤方案的设置提供科学依据,对其他地区解决沿海挡潮闸淤积问题具有十分重要的参考价值。

## 1 气动冲沙减淤防淤技术介绍

### 1.1 气动冲沙减淤防淤理论

20世纪末,罗肇森等<sup>[10]</sup>提出了“气动冲沙法”,将压缩后的空气输入河床表面并释放,辅助底沙启动,防止悬沙落淤,提高水流挟沙能力(图1)。气动冲沙减淤防淤技术是河底中加入空气而形成的气、流、沙的联合运动,是介于气体、流体和固体三者的边缘学科。

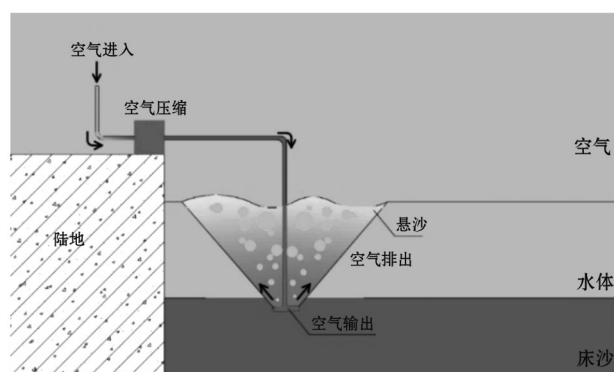


图1 气动冲沙原理

### 1.2 水流输沙模式

水流能量在其运动的过程中,一部分用于克服河床阻力,一部分通过脉动能量悬浮泥沙,另一部分用以输送底沙。窦国仁<sup>[11-12]</sup>根据能量消耗原理,推导得单位水体水流挟沙力 $S_*$ 和底沙单宽输沙量 $q_{sb}$ 的关系式如下:

$$S_* = \alpha \frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma} \frac{n^2 v^2}{H^{4/3} w} \quad (1)$$

$$q_{sb} = \frac{K_0}{C_0^2} \frac{\gamma_s \gamma}{\gamma_s - \gamma} (v - v_c) \frac{v^3}{g w} \quad (2)$$

$$\alpha = 0.025; K_0 = K, K = 0.1 \quad (3)$$

式中: $\gamma_s$ 和 $\gamma$ 分别为泥沙颗粒和水的容重; $v$ 为平均流速; $v_c$ 为用平均流速表示的泥沙起动临界流速; $H$ 为水深; $g$ 为重力加速度; $w$ 为泥沙颗粒沉速; $n$ 为曼宁系数; $C_0$ 为无尺度的谢才系数; $K$ 为水流消耗于输送临底推移和半悬移底沙的系数; $K_1$ 为底沙颗粒在水流作用下的移动速度,泥沙颗粒移动的速度应比水流的速度小,故一般情况下 $K_1 < 1$ 。根据长江、黄河的实测资料和试验室的资料分析、论证,窦国仁得

到公式中的系数,罗勇等<sup>[13]</sup>基于窦国仁公式研究水流能量与水流挟沙、输沙能量之间的关系。通过对黄河调水调沙的泥沙实测资料和试验室的数据进行研究发现,水流总能量仅有12.5%用于输送临底泥沙,水流挟沙消耗水流能量的2.3%,而气体的通入可以有效提升水体的湍动,增大泥沙的上升速度和水流的挟沙能力。

### 1.3 水槽试验相关理论

通过水槽试验明确清水排气时不同工况下气体以及对水体表面流速的影响,并建立排气量与水体表面流速的关系。将气压和孔径转化为排气量:

$$Q_{\text{气}} = \sqrt{\frac{(P_{\text{气}} - P_{\text{大气压}} - \rho_{\text{水}}gh)S^2}{\rho_{\text{气}}}} \quad (4)$$

式中: $Q_{\text{气}}$ 为排气量; $P_{\text{气}}$ 为气体压强; $P_{\text{大气压}}$ 为大气压强,取为0.1 MPa; $h$ 为喷嘴距离水面的高度; $S$ 为排气口面积; $\rho_{\text{气}}$ 为气体密度,与压强有关,0.1 MPa时取为1.242 kg/m<sup>3</sup>; $\rho_{\text{水}}$ 为水的密度; $g$ 为重力加速度。

表面流速与排气下游的距离近似呈-1次方的关系,考虑到流速随气压的增大而增大,且气压与排气量成正比,认为表面流速和排气量成正比,故暂定表面流速与排气量和测点和喷嘴的距离的关系大致为

$$v = a \frac{Q_{\text{气}}}{x} + v_0 \quad (5)$$

式中: $v$ 为下游表面流速; $x$ 为气排喷嘴下游侧距离; $a$ 为常数,与排气角度有关; $v_0$ 为无排气时水体表面流速,可由水槽平均流速表示:

$$v_0 = \beta \frac{Q_{\text{水}}}{BH} \quad (6)$$

式中: $Q_{\text{水}}$ 为流量; $B$ 为水槽宽度; $H$ 为水深; $\beta$ 为系数。

故式(5)可改写为

$$v = a \frac{Q_{\text{气}}}{x} + \beta \frac{Q_{\text{水}}}{BH} \quad (7)$$

考虑到量纲平衡,将喷嘴距离水体表面的高度 $h$ 带入式(6),得:

$$v = a \frac{Q_{\text{气}}}{hx} + \beta \frac{Q_{\text{水}}}{BH} \quad (8)$$

式中, $a$ 为未知,其余各参数为已知量,分90°垂直向下和45°斜向下游两种,将上述各参数分别代入后,经多次迭代得到较为贴合的 $a$ 值,其中90°垂直向下取 $a=9\ 800$ ,45°斜向下游取 $a=13\ 900$ 。

## 2 气动冲沙现场试验方法与方案设置

### 2.1 研究区域现状

新沂河位于江苏北部(图2)。上自嶂山闸始,

途经新沂、宿豫、沐阳、灌南、灌云等县,最后在灌云县燕尾镇西南汇入灌河,全长约147 km,是沂沭泗水系的主要排洪入海通道<sup>[14]</sup>。1997年,新沂河海口枢纽控制工程采取了挖泓建闸的形式,形成了三滩两泓的格局。2006年进行扩建,扩建后的新沂河海口控制工程由3座深泓闸组成,泓道两侧建有4条翼墙。设计时在翼墙上设有引排水孔,在涨落潮时保证翼墙内外水压力一致。涨潮期间,高含沙水体通过翼墙上的引排水孔进入翼墙内,由于落潮速度远慢于涨潮,翼墙内水体几乎静止,导致大量泥沙落淤(图3)。翼墙内淤积是挡潮闸闸下淤积的重要组成部分,若淤积高度堵塞引排水孔,将会导致翼墙内外在涨落潮期间产生较大水压力,极大地增加了翼墙的倾覆风险。目前,采用机械挖掘机每2年进行1次清淤,单次成本为20万元,清淤难度大且成本高。



图2 新沂河海口枢纽挡潮闸



图3 翼墙内淤积现状

### 2.2 气动冲沙设备

根据气动冲沙技术原理,准备的现场试验设备有空压机、喷气管网、起重机和取样器(图4)。空压机输出峰值压强为0.65 MPa。铺设底部的喷气管网的长和宽分别为2 m和1 m,排气嘴孔径为1、2、



5、10 mm。喷气管网喷嘴方向与管网的夹角分别为45°和90°两种。喷嘴数量为20个,每个喷嘴可以调节开关状态。试验过程中在喷气管网上增加了取样器,在排气过程中获取水体样本。

### 2.3 试验方案设置

试验工况参数设置如表1所示,工况1~3研究对比不同排气方式的减淤效果,工况4~5研究对比不同喷嘴角度的减淤效果,工况6~9研究对比不同喷嘴孔径的防淤效果。

## 3 结果分析

### 3.1 减淤效果试验

#### 3.1.1 不同排气方式的减淤效果

现场试验过程中,3种不同气压下排气第5 min浑水团面积如图5所示。方案1共进行30 min气动冲沙减淤试验,0.2 MPa持续排气、0.2~0.4 MPa脉冲排气和0.2~0.65 MPa脉冲排气工况下,最大冲沙深度分别达到0.15 m、0.23 m和0.37 m,平均冲沙坑体积分别为0.024 m<sup>3</sup>、0.055 m<sup>3</sup>和0.143 m<sup>3</sup>,冲沙坑总体积分别约为0.2 m<sup>3</sup>、0.44 m<sup>3</sup>和1.14 m<sup>3</sup>。随着排气的压力增大,冲沙坑体积越大,减淤效果越好。

#### 3.1.2 不同喷嘴角度的减淤效果

现场试验过程中,两种不同喷嘴角度下排气第

20 min浑水团面积如图6所示。方案2共进行20 min气动冲沙减淤试验,喷嘴角度90°和45°持续排气工况下,最大冲沙深度分别达到0.31 m和0.25 m,冲沙坑总体积分别约为0.95 m<sup>3</sup>和1.2 m<sup>3</sup>。喷嘴角度90°工况下冲沙深度较深,而喷嘴角度45°工况下冲沙坑总体积较大,且在落潮后发现,45°工况下的冲沙坑面积约为90°工况下的3倍。综合分析,喷嘴角度90°适用于清淤范围小且冲淤深度要求较高的情况,而喷嘴角度45°适用于清淤范围较大且淤积强度中等的情况。

### 3.2 防淤效果试验

研究不同喷嘴孔径对于闸下防淤效果(图7),共进行20 min气动冲沙防淤试验。将浑水团面积作为防淤效果评估的重要指标之一,统计不同孔径下浑水团面积随时间变化过程(图8)。防淤试验的前12 min,浑水团面积与喷嘴孔径成正比,但随着时间推移,各喷嘴孔径下的浑水团面积差越来越小。综合考虑防淤效果和经济成本,2 mm喷嘴孔径更适用于日常防淤工作。

## 4 结论与展望

针对新沂河海口枢纽挡潮闸闸下淤积问题,采用了气动冲沙减淤防淤技术进行现场试验研究,具

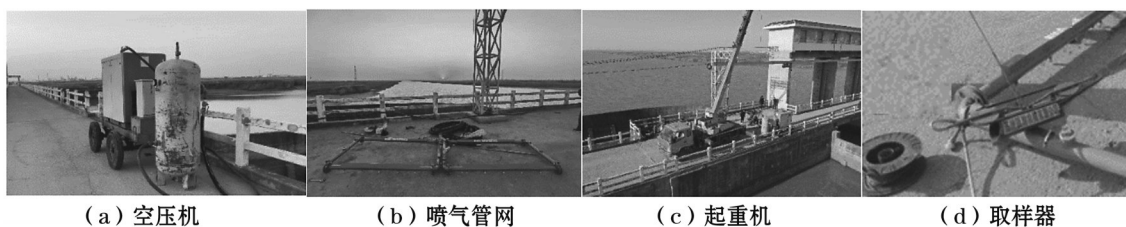


图4 试验设备

表1 试验工况

工况	孔径/mm	喷嘴数量/个	气压/MPa	时间/min	喷嘴角度/(°)	水深/m
1	10	8	0.2 MPa持续排气	30	90	3.5
2	10	8	0.2~0.4 MPa脉冲排气	30	90	3.5
3	10	8	0.2~0.65 MPa脉冲排气	30	90	3.5
4	5	8	0.65 MPa持续排气	20	90	3.5
5	5	8	0.65 MPa持续排气	20	45	3.5
6	1	10	0.65 MPa持续排气	20	45	2.5
7	2	10	0.65 MPa持续排气	20	45	2.5
8	5	10	0.65 MPa持续排气	20	45	2.5
9	10	10	0.65 MPa持续排气	20	45	2.5

注:0.2~0.65 MPa脉冲排气指喷嘴处释放的高压为0.65 MPa,低压为0.2 MPa,高压与低压工况排气时间均为1 min,高低压交替排气。

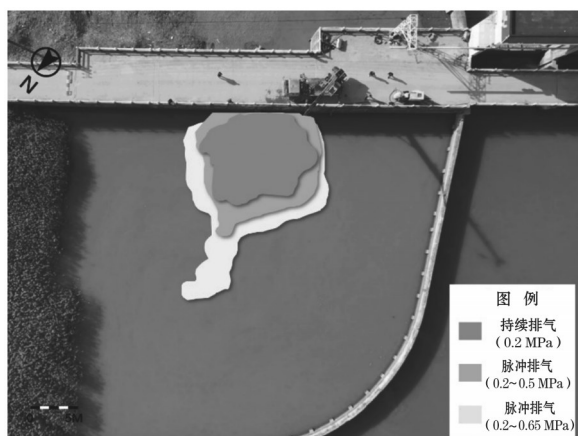


图5 不同排气方式的减淤效果(5 min)

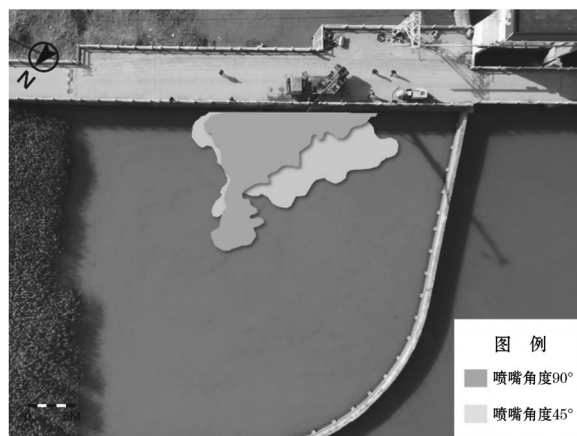


图6 不同喷嘴角度的减淤效果(20 min)

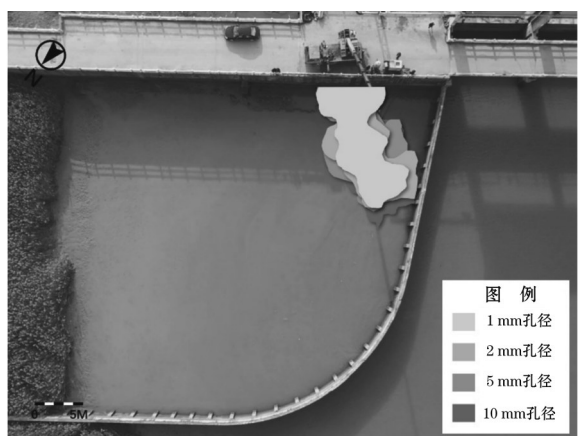


图7 不同孔径的泥沙防淤效果(5 min)

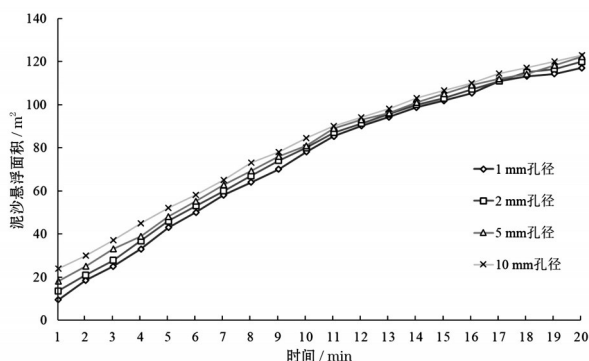


图8 浑水团面积随时间变化情况

体结论如下:(1)考虑排气气压和喷嘴角度对闸下减淤效果的影响。结果表明:排气气压与冲沙坑体积成正相关关系;喷嘴角度 $90^{\circ}$ 适用于清淤范围小且冲淤深度要求较高的情况;喷嘴角度 $45^{\circ}$ 适用于清淤范围较大且淤积强度中等的情况。(2)考虑喷嘴孔径对闸下防淤效果的影响,综合考虑防淤效果和经济成本,2 mm喷嘴孔径更适用于日常防淤工作。

气动冲沙减淤防淤技术通过自动化控制系统使得防淤减淤设备定期排气,同时能随潮流变化实现主动清淤,实现潮闸闸下智慧化减淤防淤,该技术运用于沿海挡潮闸闸下减淤防淤的前景十分广阔。

#### 参考文献:

- [1] 辛文杰,张金善.我国建闸河口闸下淤积问题及其对策[R].南京:南京水利科学研究院,2003.
- [2] 龚政,窦希萍,张长宽,等.江苏沿海滩涂围垦对闸下港道淤积的影响[J].水利水运工程学报,2010(1):73-78.
- [3] 朱建英,李春华,陆体成.里下河地区沿海主要港道冲淤规律及影响要素探析[J].泥沙研究,2015(3):35-41.

- [4] 许德智,蔡洪卿,陆体成,等.挡潮闸下港道清淤机具的改进及应用[J].海洋工程,2001(2):74-78.
- [5] 黄广勇,查红,闻余华.沿海涵闸典型年入海径流(量)与闸下港道冲淤关系分析[J].江苏水利,2015(12):27-29,31.
- [6] 唐豪.缓流水域的气动减淤机制研究[D].南京:河海大学,2022.
- [7] 李海泉.盐灌船闸下游武障河泥沙模型试验研究[D].南京:河海大学,2007.
- [8] 徐进超,丁磊,罗勇.气动冲沙数值仿真模型研究[J].人民黄河,2019,41(6):29-33.
- [9] 丁磊,杨啸宇,罗勇,等.小浪底水库气动冲沙现场试验研究[C].//第二届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(下),2022:1037-1044.
- [10] 罗肇森,罗勇.一种治沙输沙的新理念和方法[J].泥沙研究,2009(4):31-38.
- [11] 窦国仁.论泥沙起动流速[J].水利学报,1960(4):44-60.
- [12] 窦国仁.再论泥沙起动流速[J].泥沙研究,1999(6):1-9.
- [13] 罗勇,窦希萍,罗肇森.气动冲沙法治理黄河泥沙的一点思考[J].水利学报,2007(S1):276-282.
- [14] 张玮,陈锡林,徐金环,等.新沂河口控制工程闸下河道冲刷试验研究[J].海洋工程,1999(2):60-70.