

## · 施工 ·



# 小口径排泥管输送加气技术 现场试验研究

肖 建<sup>1</sup>, 曹凯飞<sup>1</sup>, 骆佳成<sup>2</sup>, 袁超哲<sup>2</sup>, 李盼盼<sup>2</sup>

(1. 中交上航(福建)交通建设工程有限公司, 福建厦门 361000;

2. 中交疏浚技术装备国家工程研究中心有限公司, 上海 200090)

**摘要:** 小型疏浚工程通常采用小型绞吸船进行施工, 小型绞吸船由于泥泵功率较小, 导致输送排距无法满足需求, 本文探讨小口径排泥管加气技术对管道排距的影响。现场试验依托石门澳蓄滞清淤吹填工程, 在吹填管上相距 300 m 的 2 个位置进行试验, 分别使用空压机直接加气和射流器混合加气两种方式。试验结果表明, 管道加气技术能够有效提升输送排距。空压机直接加气效果比射流器混合加气效果更好, 加气点靠近船端位置效果最好, 平均增加排距 22.2%, 射流器混合加气平均增加排距 12%。现场试验验证了疏浚排泥管加气技术的可行性, 为疏浚工程排距问题提供了新的解决思路。

**关键词:** 管道加气; 管道输送; 疏浚

中图分类号: U 616+.6

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)11-0227-05

## Field test of aeration technology for small-diameter dredging pipe transportation

XIAO Jian<sup>1</sup>, CAO Kai-fel<sup>1</sup>, LUO Jia-cheng<sup>2</sup>, YUAN Chao-zhe<sup>2</sup>, LI Pan-pan<sup>2</sup>

(1.CCCC SDC(Fujian) Communication Construction Engineering Co., Ltd., Xiamen 361000, China;

2.CCCC National Engineering Research Center of Dredging Technology and Equipment Co., Ltd., Shanghai 200090, China)

**Abstract:** Small-scale dredging projects usually adopt small cutter suction dredgers for construction. Nevertheless, the transportation and discharge distance of such dredgers fail to meet the demands due to the small power of their dredge pump. This paper explores the impact of the aeration technology for small-diameter dredging pipes on the pipeline's discharge distance. The field test relies on the Shimen'ao storage, retention, dredging and reclamation project and takes place at two positions 300 m apart on the reclamation pipe in two modes, namely direct aeration with an air compressor and mixed aeration with a jet aerator. The test results show that the proposed pipeline aeration technology can effectively improve the transportation and discharge distance. Specifically, direct aeration with an air compressor produces a better result than that of mixed aeration with a jet aerator, especially when the aeration point is close to the end of the ship, and achieves an average increase of 22.2% in discharge distance, while mixed aeration with a jet aerator increases the discharge distance by 12% on average. The field test verifies the feasibility of the aeration technology for dredging pipes and provides a new solution to the discharge distance problem in dredging engineering.

**Keywords:** pipeline aeration; pipeline transportation; dredging

在疏浚船舶施工中, 主要分为清淤、管道输送、吹填 3 个部分, 其中管道输送是非常重要的

环节, 吹填过程能源损耗主要来自于管道阻力和势能变化, 因此, 提高管道的输送性能一直是疏

浚吹填工程的优化方向。减少输送能耗损失可从管线优化、浆体阻力、管道材料阻力等方面考虑。管线优化需要移动位置，工程量大且影响施工；更换管道材料降低阻力不够经济；改变浆体特性从而降低阻力的方式更具有可行性。改变输送液体特性的方式主要有：调整输送浓度使其与输送状态匹配达到能耗最优；添加其他物质如减阻剂、气体等减少阻力。

管道加气减阻技术最先由日本开始研究，前期验证了该项技术的有效性，且空气作为减阻剂具有无污染、可直接获取等优点，吸引学者对管道加气技术进行研究。于利伟等<sup>[1]</sup>设计了管道加气试验装置，初步探讨了加气参数及效果；朱汉华等<sup>[2]</sup>和汤勃等<sup>[3]</sup>进行补充试验完善了泥浆浓度、主管流量和加气压力等参数之间的关系；熊庭等<sup>[4]</sup>建立加气减阻技术的分层流动模型和段塞流动模型，结果表明：在分层流动状态下输入部分气体会减小阻力，段塞流动状态下，输入气体会增大阻力；汤勃等<sup>[5]</sup>和蔡勇<sup>[6]</sup>针对加气装置进行研究，进行了多种加气喷头的室内对比试验，结果表明旋转射流水气混合喷射加气效果最好；熊庭<sup>[7]</sup>对加气技术的减阻机理、减阻效果、减阻范围等问题开展研究，开展了理论、试验及应用3个部分工作，确定了管道输送加气最优参数。

目前的研究多停留在理论分析和室内试验阶段，实际应用仅有厦门马銮湾生态修复项目<sup>[8]</sup>和南安市海峡科技生态城项目，且研究深度不够。本文针对当前研究的不足之处，依托莆田石门澳工程，开展射流管加气和直接大气量加气两种方式在工程上的应用研究，对比分析增排效果差异，为加气技术的实际应用提供参考。

## 1 现场试验

莆田市秀屿区石门澳产业园滞洪区清淤项目与吹填区距离远，属狭长型清淤，最远吹距约6 km，最短吹距仅有2 km，小型绞吸船满载吹距

最远仅3 km，吹填过程存在单船泵送能力不足到过剩的转变（图1）。前期泵送能力不足，需增加接力泵，面临成本高、维护难和磨损大等问题。在该工程背景下，开展了加气助推技术现场研究，总结管道输送的加气减阻技术方案。



图1 石门澳工程狭长形清淤区

### 1.1 试验点布置

根据现场管道走线、绞吸船和接力泵的位置选取试验点，施工现场布局见图2。

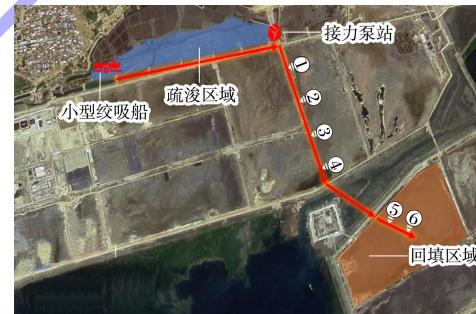


图2 施工现场布局

在地势较为平坦的吹填围区设置4个数据监测点采集管道输送的流量、压力、密度及试验设备数据。测点1位于接力泵后150 m位置，配备2个压力传感器、1个密度计、1个流量计传感器；在测点1后间隔283.2、281.3、297.0 m处分别设置压力测点2~4用于测量管道内部压力，管道出口距离点1约1.8 km。其中点1、2位置靠前，选取为试验点。

### 1.2 试验装置

试验装置主要分为2个部分，数据采集装置和加气装置。数据采集使用模拟量采集器将流量、压力和密度电流值转化为数字量数据，然后通过

4G-DTU 模块传输到远程电脑, 实现管道数据的同步采集和实时检测, 数据采集周期为 1 s, 试验同步采集所有接入系统的传感器设备, 并将数据实时绘制在电脑上(图 3)。流量计和密度计安装于气体加入点前端(图 4), 以避免高压气体对数据的干扰, 保证流量和密度实测数据的准确性。同时, 在加气试验点前后各安装有压力传感器, 用于监测加气前后管段的压力变化特性。

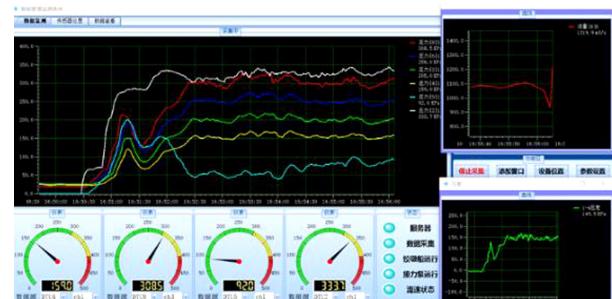


图 3 数据显示



图 4 管道监测设备

加气试验用到发电机、空压机、压力罐、射流水泵和射流器调压阀等设备, 试验设备参数为: 大禹 2 号绞吸船船泵功率 760 kW; 刀头直径 1.2 m; 输送管道内径 DN 400; 接力泵设计功率 280 kW; 螺杆空压机功率 70 kW; 额定气量 12 m<sup>3</sup>/min; 额定压力 1.0 MPa; 恒压水泵设计扬程 100 m; 设计流量 12 m<sup>3</sup>, 恒压范围 0.1~1.0 MPa; 气体恒压调节阀范围 0~1.2 MPa。

本次试验管道加气方式分为 2 种, 一种使用空压机直接对管道进行加气, 将大量气体加入管道中; 另一种采用射流器将水和气体混合加入管道中, 加入量较小。射流器加气采用气体包裹水的方式进行混合, 形成水气混合再注入管道中,

气体的加入压力由调压阀进行控制, 水压由恒压水泵设定压力进行混合。射流加气时空压机和水泵需同时工作。射流加气采用通用的 DN25 口径大小的不锈钢射流器(图 5)。

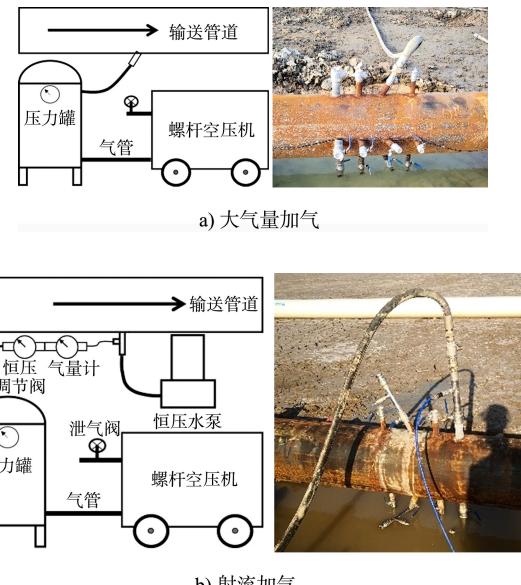


图 5 加气方式

### 1.3 现场试验

现场进行了大气量加气和射流加气 2 种加气方式的对比试验, 分别在测点 1、2 两个位置进行试验, 两者相距约 300 m。为保证试验的准确性, 加入口均选择管道顶部的 45°DN25 入管口进行试验。加气压力、气量和水量等参数见表 1。

表 1 试验参数

试验点	加气方式	加气压力 力/kPa	加气量/ (m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	加水压 力/kPa	加水流量/ (m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )
1	大气量直加	450	200.0	-	-
1	射流加气	500	2.9	600	1.4
2	大气量直加	450	200.0	-	-
2	射流加气	450	3.0	600	1.5

大气量加气方式与管道直接相连, 加气压力比管道压力略大; 而射流加气方式在加入前有相应的调节装置, 射流器可以输入更高的压力。大气量加气试验关闭恒压水泵, 打开空压机和半开泄气阀, 待压力罐内压力达到需要的压力时, 打开管道射流入口球阀, 开始大气量试验; 射流加气试验过程中开启恒压水泵和气泵, 将两者设定至指定的压力, 再打开球阀将水气混合物加入管

道中。试验过程中实时进行数据采集，并记录试验前船舶正常施工情况下的流量、压力、平均密度等数据，作为对比数据。

## 2 试验数据及分析

### 2.1 分析方法

管道输送阻力受到管道浓度、流量和压差等多方面影响，实际工程中三者处于动态调整过程。加气后对管道输送产生多种影响：由于加气压力大于管道内部压力，加气将导致管道内部压力增大，增加输送水头，同时，气体进入管道内部，浆体混合气体导致浆体黏滞系数变化，引起流量增加（图 6），两种减阻因素导致不同数据变化，难以根据直接监测数据准确评估加气效果。

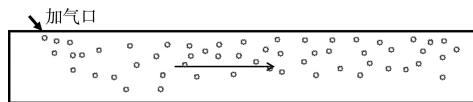


图 6 加气管道内部

为综合评价加气效果，采用排距指标进行减阻效果比较，包括管道增压和输送减阻带来的增排效果。总排距计算公式为：

$$\Delta L = \Delta L_p + \Delta L_\lambda \quad (1)$$

式中： $\Delta L$  为增加排距的距离（m）； $\Delta L_p$  为加气后管道内压力增加引起的排距增量（m）； $\Delta L_\lambda$  为输送加气之后阻力改变引起的排距增量（m）。

$$\Delta L_p = \frac{\Delta P_{dt}}{P_{dl}} \quad (2)$$

式中： $\Delta P_{dt}$  为加气后测点增加的压力值； $P_{dl}$  为管道未加气状态下的每米压降，此参数可用 2 个测点的压力差算出。

管道阻力系数采用疏浚规范中的输送阻力公式：

$$\lambda = \frac{2\Delta P_p d}{\rho_m l v^2} \quad (3)$$

式中： $\Delta P_p$  为管段减去高程压头后的管道压差（MPa）； $\lambda$  为直管段阻力系数； $\rho_m$  为管道中浆体的密度（t/m<sup>3</sup>）； $l$ 、 $d$ 、 $v$  分别为管段长度（m）、管道内径（m）、管内平均流速（m/s）。

$$\Delta L_\lambda = \left( 1 - \frac{\lambda_n}{\lambda_o} \right) L \quad (4)$$

式中： $\lambda_n$  为加气后管道的阻力系数； $\lambda_o$  为未加气时段的管道阻力系数； $L$  为加气点后管道长度（m）。

试验前采集绞吸船正常施工时的典型工况数据，管道输送平均流量 1 244.9 m<sup>3</sup>/h，管中平均密度 1 184.2 t/m<sup>3</sup>，试验点后长 1 800 m，测试点 1、2 相距 300 m，测量管段施工期平均压降 0.173 4 kPa/m，管道阻力系数平均值为 0.017 2，以上述典型工况数据作为计算式中  $\rho_m$ 、 $l$ 、 $P_{dl}$ 、 $\lambda_o$  等参数的基础值。射流加气方式下加入清水 1.5 m<sup>3</sup>，该数值相对较小，因此可以忽略加入清水对管道内部的影响。

### 2.2 试验效果分析

试验过程采集流量、压力、密度传感器数据，将采集的数据代入排距增加计算公式得出各试验数据。将测试点 1、2 的试验过程加气导致的压力增加数据绘制于图 7，增压数据为测试点相对未加气前的压差。

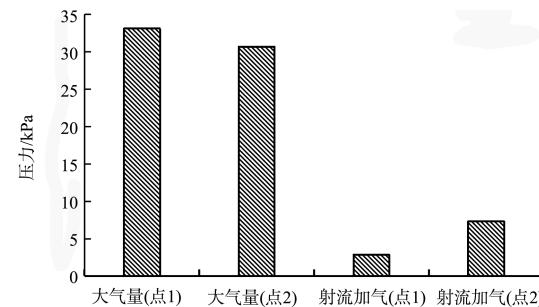


图 7 试验工况增压效果

外界的气体能量加入管道必定导致内部的压力增加，管道压力水头增大可以延长排距。大气量加气方式是空压机大气量直接加入管道，导致管内压力大幅度提升，试验点 1、2 的压力提升分别为 33.1、30.6 kPa；射流管加气属于气液混合液体加入，加入物质的量也对较小，试验点 1、2 的压力提升分别为 2.8、7.3 kPa，两者均有增压效果。

两种加气方式减阻的机理不同：大气量进入管道中，主要减阻因素为气体占据管道空间的一部分，减少浆体与管道接触的湿周，次要因素是部分气体混入浆体中，导致浆体内部的摩阻变小。

导致的减阻效果; 而射流加气侧重于气体与水充分混合, 进入浆体后在管道中分布较为均匀, 以小型气泡的方式存在浆体中, 稀疏浆体的内部结构降低了浆体的黏滞力, 减少了输送阻力。试验减阻效果见图 8, 大气量点 1 的减阻效果最好达到 15.1%, 点 2 达到 7%, 射流加气点 1、2 效果均可达到 10% 左右, 以较少的气量达到较好的减阻效果。大气量方式加气量约  $200 \text{ m}^3$ , 在点 2 的减阻效果比射流加气效果差, 表明加气量并不是越大越好, 一定的气量在一定管道压力的情况下可能是气体屏障, 从而降低了减阻效果, 因此加气量和加气压力要根据管道压力决定。

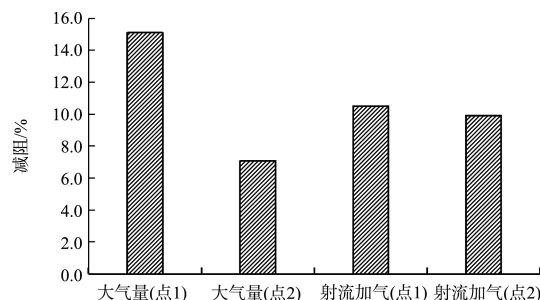


图 8 各工况减阻效果

各工况增加排距试验结果见表 2 和图 9。通过综合评价指标排距增加值对各工况进行评估, 大气量加气方式由于大量的能量加入和气泡减阻效果导致增排效果较好, 比射流加气方式增排距离更长。最佳效果是大气量加气方式在点 1 达到  $462.6 \text{ m}$ , 大气量压力增加延长的排距分别达到  $190.8$ 、 $176.8 \text{ m}$ , 减阻效果增加排距分别为  $271.8$ 、 $106.2 \text{ m}$ 。射流加气增压带来的排距增加较小, 分别为  $16.3$ 、 $42.0 \text{ m}$ , 而气液混合加入管道具有较高的减阻效率, 能够以较小的气量达到较好的减阻效果, 在水气混合方量小于  $5 \text{ m}^3/\text{h}$  情况下减阻效果达到 10%, 分别增加排距  $189.1$ 、 $148.9 \text{ m}$ 。

表 2 各工况增加排距试验结果

试验工况	增压/kPa	减阻/%	增压增加	减阻增加	总增加
			排距/m	排距/m	排距/m
大气量(点1)	33.10	15.10	190.8	271.8	462.6
大气量(点2)	30.67	7.08	176.8	106.2	283.0
射流加气(点1)	2.83	10.50	16.3	189.1	205.4
射流加气(点2)	7.30	9.92	42.0	148.9	190.9

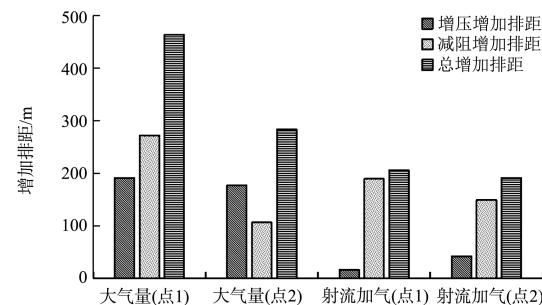


图 9 各工况增加排距试验结果

对比 4 种加气工况可知: 1) 加气位置方面: 试验点 1 效果均好于点 2; 2) 减阻方面: 后续管道距离越长, 减阻所延长的排距越大, 并且加气位置靠前更容易获取电力等能源, 易于布设加气设备, 因此需要选择较为靠前的加气位置; 3) 加气方式方面: 大气量加气方式有较好的增压效果, 导致总增排效果优于射流加气, 但点 2 减阻效果不如点 1, 证明加气量并不是越大越优, 需要根据管道压力设定; 射流加气方式的增压效果几乎可忽略, 以减阻效果为主, 总体增排效果达到 12%; 4) 功耗方面: 大气量加气方式平均增加每米排距需要  $0.15 \text{ kW}\cdot\text{h}$  电量, 而射流加气可以较小的能耗达到不错的效果, 平均增加每米排距需要  $0.105 \text{ kW}\cdot\text{h}$  电量, 射流加气能耗比更优。加气方式需根据需求选择, 以直接增加排距为主要目的时可选择大气量加气方式, 需要减少能耗以满足经济性要求时, 优选射流加气方式。

### 3 结论

1) 管道加气技术在小管径疏浚工程中具有增排减阻的效果。

2) 空压机直接连接管道的大气量加气方式效果最优, 但加气量并不是越大越好, 需根据管道压力情况而定; 射流管加气的方式增排效果虽然不如大气量方式, 但其优点在于增加每米排距仅需耗能  $0.105 \text{ kW}\cdot\text{h}$ , 经济性较优。

3) 在现场试验中大气量加气最优效果为增加排距  $462.6 \text{ m}$ , 2 个试验点平均增加排距  $372.8 \text{ m}$ ; 射流加气最优效果为增加排距  $205.4 \text{ m}$ , 2 个试验点平均增加排距  $198.2 \text{ m}$ , 在石门澳工程中, 两种加气方式平均增排效果分别达到 22.2% 和 12.0%。