



DN850 管道浆体输送加气节能 技术现场试验研究

林明臻

(福建省湄洲湾港口发展中心东吴港务站, 福建 福州 351100)

摘要: 针对大型疏浚吹填工程中 DN850 管道浆体输送距离远、能耗高等问题, 采用现场试验的方法, 以厦门机场大小嶝造地工程为依托, 研究输送细砂含淤泥土质工况下管道加气技术的节能效果。试验结果表明, 加气技术适用于大口径管道和细砂含淤泥土质, 可减少 DN850 管道浆体输送阻力约 5%, 增加吹填排距约 5%, 减少吹填施工平均油耗约 3.84%。现场试验证明绞吸挖泥船排泥管输送节能技术可减少泥泵开启数量和输送阻力, 且设备投入成本低, 为绞吸挖泥船节能减排提供了新技术支撑。

关键词: 疏浚吹填; 加气; 节能; 绞吸挖泥船; 多泵串联

中图分类号: U616+.6

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)07-0232-05

Field test study of aeration energy-saving technology for slurry conveying in DN850 pipeline

LIN Mingzhen

(Dongwu Port Authority Station of Fujian Province Meizhou Bay Port Development Center, Fuzhou 351100, China)

Abstract: Aiming at the problems of long slurry transportation distance and high energy consumption of DN850 pipeline in large-scale dredging and reclamation projects, the energy-saving effect of pipeline aeration technology under the conditions of transporting fine sand and silt-containing soil is studied by using the method of field tests and relying on the Xiamen Airport's Da-Xiaodeng Land Reclamation Project. The results indicate that aeration technology is suitable for large-diameter pipelines and fine sandy silt soils, reducing the slurry transportation resistance of DN850 pipeline by approximately 5%, increasing the reclamation discharge distance by about 5%, and reducing the oil consumption the backfill construction by approximately 3.84%. Field tests have proved that the energy-saving technology for conveying sludge through the discharge pipe of cutter suction dredgers can reduce the number of sludge pumps opened and the conveying resistance, and the equipment investment cost is low, which provides a new technology for energy conservation and emission reduction of cutter suction dredgers.

Keywords: dredging and reclamation; aeration; energy saving; cutter suction dredger; multi-pump in series

管道输送减阻方法一般有: 加高分子聚合物或某种润滑液、加纤维状材料、加细颗粒泥沙和加气, 在不同的输送需求和操作条件下, 这些技术各有优劣^[1]。其中, 加气减阻技术通过向流体中注入气体, 形成气液混合流, 不仅显著降低了流体阻力, 还有助于固体颗粒悬浮, 防止沉积, 从而保持管道的畅通无阻^[2]。这一技术特别适合

长距离输送, 可有效降低输送阻力, 减少能耗和降低长期运营成本。其潜在优势使其成为疏浚吹填项目中的理想选择。最早日本开展了管道加气减阻技术可行性的研究, 其减阻方式具有无污染、减阻剂易获取(空气)及易实施等特点, 后续众多研究者从理论机理、室内试验、加气成套设备研发和工程应用等层面开展了系列研究。

收稿日期: 2024-09-30

作者简介: 林明臻 (1977—), 男, 高级工程师, 从事港口航道及治河工程。

曹凯飞等^[3]和熊庭等^[4]通过数值模拟方法,从机理分析开展小管径加气参数研究,对加气工艺参数进行定性分析,并优化了室内试验装置。蔡勇等^[5]、汤勃等^[6]、于利伟等^[7]和熊庭^[8]建立加气减阻技术室内试验平台,开展加气装置的设计优化和加气效果分析。针对加气减阻技术的现场应用测试,林煜等^[9]在厦门马銮湾生态修复工程已开展初步的探索,但未形成适用于工程现场的加气减阻节能工艺参数;李盼盼等^[10]和肖建等^[11]在莆田市秀屿区石门澳产业园滞洪区清淤工程中开展了小口径排泥管淤泥输送工况下的现场测试与应用,给出小口径排泥管加气输送增压、减阻、增排和节能效果。

然而,针对大口径排泥管输送加气对输送能耗的影响研究尚处于空白阶段。虽然针对小口径加气已有研究成果,但是并无大口径的实际效果,未形成可指导现场施工的加气施工工艺参数,无法将该成果在大口径吹填施工中直接应用。

本文依托厦门大小嶝造地工程(9.81 km²)标段 I 项目(简称“厦门大小嶝造地工程”)3 500 m³大型绞吸挖泥船(排泥管口径 DN850),开展细沙混淤泥土质工况下加气减阻、增排和绞吸挖泥船泥泵运行工艺参数优化的系列研究,并对其输送能耗进行分析,给出适用于大口径加气的施工工艺参数,并基于此对绞吸挖泥船多泵串联施工工艺进行优化,旨在为大口径排泥管浆体输送的节能减排提供新的技术支撑。

1 现场试验

1.1 工程概况

本文依托厦门大小嶝造地工程的 3 500 m³绞吸挖泥船吹填施工项目。工程吹填区航拍见图 1,吹填面积约 9.81 km²,最大吹填排距可达 4.5 km,工程供砂量大于 5 000 万 m³,单船最大供砂强度约为 500 万 m³。

针对厦门大小嶝造地工程吹填排距长、供砂强度高和能源消耗大的现状,开展大口径管道浆体输送加气节能技术现场试验研究,以实现绞吸挖泥船排泥管输送阻力降低、减少输送能耗的目标。



图 1 工程吹填围区

Fig. 1 Land reclamation area of engineering

1.2 试验装备

试验过程中,所用设备和传感器主要包括加气点位处的空压机、加气专用短管、单向阀、球阀、调压阀、气体流量计、气压计和风炮管。其中空压机额定功率 110 kW、额定气量 12 m³/min、额定排出压力 1.5 MPa。加气专用短管见图 2。



图 2 加气专用短管

Fig. 2 Special short tube for aeration

1.3 试验方法

为了探究加气对 DN850 管道浆体输送的减阻和节能效果,根据现场排泥管线铺设情况,将加气点位设置在上岸后适合加气的管线处。排泥管线加气装置整体布置见图 3。测试期间,吹填排距通过三通液压闸阀在 3.2~4.0 km 之间切换,短排距工况下绞吸挖泥船为 2 泵吹填施工,长排距工况下绞吸挖泥船为 3 泵吹填施工。加气点后排泥管线沿程布设 4 个压力测量点位,压力传感器采用平膜式压力传感器,以防止泥沙堵塞压力传感器。

针对绞吸挖泥船吹填排距变化情况,设计试验工况,开展绞吸挖泥船 2 泵和 3 泵吹填工况下的加气助推管道输送的现场测试,试验工况见表 1。

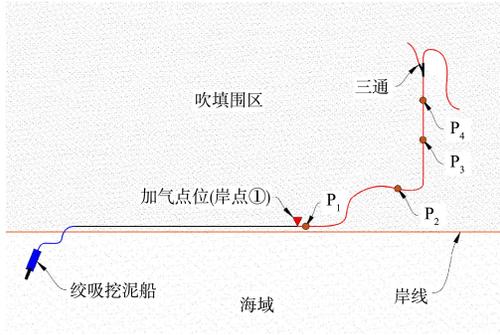


图3 加气试验整体布置

Fig. 3 Overall layout of aeration test

表1 试验工况
Tab. 1 Test conditions

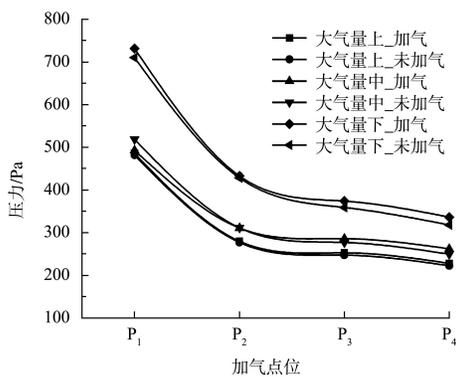
工况	泵数量/ 个	加气 点位	气压/ kPa	气量/ (m ³ ·h ⁻¹)	吹填 排距/km
1	2		11	716	4.0
2	2	岸点①	11	744	4.0
3	3		11	815	4.0

2 减阻效果分析

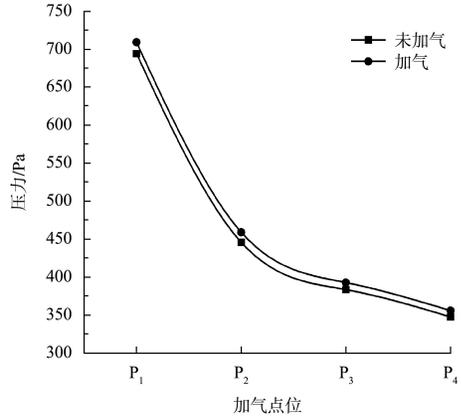
2.1 加气前后沿程压力变化

对比加气和不加气工况下加气点后排泥管线输送阻力和整体水头消耗情况。绞吸挖泥船2泵和3泵不同吹填排距下，加气点后排泥管线4个沿程压力测点的压力变化情况见图4。同时，通过RTK测量获取4个压力测点的高程，用于计算排泥管线沿程压力的下降值。

P₁点临近加气点位，从图4可以看出，气体刚加入时导致局部阻力上升，加气沿程压力逐渐减小。



a) 2泵



b) 3泵

图4 加气前后沿程压力变化
Fig. 4 Pressure variation along way before and after aeration

2.2 加气减阻效果

根据式(1)获取压力测点P₃和P₄之间的压差，并结合测点高程和排泥管线长度，计算加气前后排泥管线输送阻力变化。

$$I_m = \frac{\Delta P - \rho g \Delta h}{\rho g L} \quad (1)$$

式中： I_m 为浆体输送阻力，mH₂O/m； ΔP 为测点间压力差，kPa； g 为重力加速度，取9.81 m/s²； ρ 为海水密度，取1.025 g/cm³； Δh 为测点间高程差，m； L 为测点间管线长度，m。

加气前后排泥管线输送阻力的变化情况见图5。加气后，输送阻力整体下降2.38%~8.43%，平均减阻约5%。

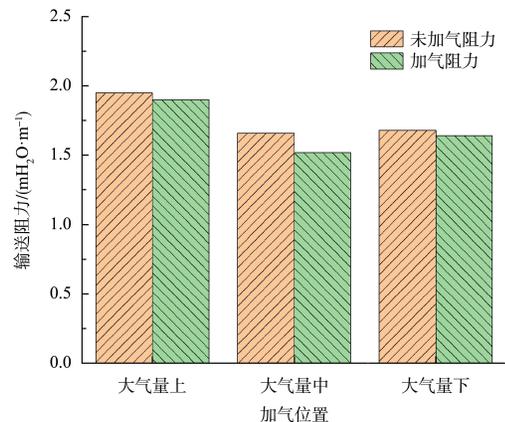
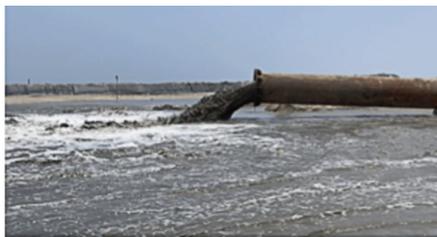


图5 加气前后输送阻力变化
Fig. 5 Variation of conveying resistance before and after aeration

排泥管线出口处加气前后的出流情况见图6。图6a)为加气后管口的满管出流,图6b)为未加气管口的非满管出流。



a) 加气后



b) 未加气

图6 加气前后排泥管线出口处出流情况
Fig. 6 Outflow condition at outlet of sludge discharge pipeline before and after aeration

2.3 加气增排节能分析

加气后排泥管线的输送阻力降低,既能增加现有产能情况下两泵的极限吹填排距,也能降低给定吹填排距的燃油消耗,实现节能增排。

2.3.1 增加两泵的极限吹填距离

输送吹填增加距离 ΔL_p 计算公式为:

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

式中: ΔP_{dr} 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,可由2个测点的压力差得出。

加气后排泥管线的输送阻力平均降低5%,理论上现有两泵的极限吹填距离可延长5%。整条管线岸上段为3.5 km,加气延长两泵极限吹填排距可达3.68 km,无需开启3泵,即可以减少燃油消耗。按照每天推进30 m排泥管线计算,预计可以节省5 d燃油消耗量,较开启两泵情况下油耗减少1/4左右,预计可以节省11.25 t/d,5 d预计可以

节省56.25 t,每个围区大约每2个月出现1次极限排距工况,则1年周期可以节省燃油337.5 t。

2.3.2 输送节能分析

加气后排泥管线的输送阻力平均降低5%,整体而言可相应减少5%的能耗。

厦门机场配置的110 kW螺杆空压机主要以风炮管直接加工况的需求进行配置。该110 kW螺杆空压机的单日油耗为0.53 t,由于加气减阻,其每天可以节省1.8 t,因此每天节省燃油1.27 t。相比于未加工况,根据吹填方量在2 000万 m^3 计算,累计节约燃油508 t。

工程应用期间实现DN850管道上平均减阻5%,每天施工产能以5万 m^3 计,则节省燃油0.36 t/万 m^3 ,相比于未加工况,平均降低油耗3.84%。加气后输送油耗降低分析见图7。

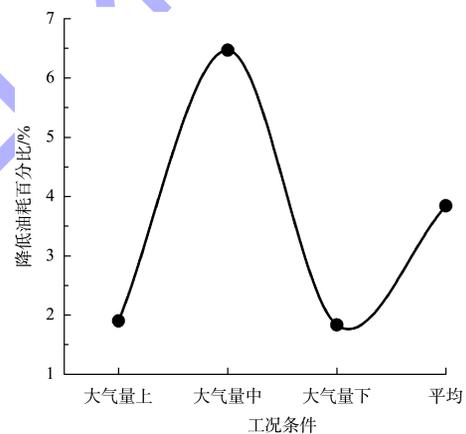


图7 加气后输送油耗降低分析

Fig. 7 Analysis of reduced fuel consumption during transportation after aeration

3 结论

1) DN850管道加气后,可以实现管道输送阻力降低3%~5%,油耗下降3.84%;增加工程极限排距,减少泥泵开启数量。

2) DN850管道加气可以增加两泵极限排距约5%,相比于开启第3个泥泵,每天可以节省燃油约1.8 t。工程应用期间实现DN850管道上0.68%~8%的减阻效果,最优加气方式下平均减阻5%,节省油耗0.36 t/万 m^3 ,以每天5万 m^3 的施工产能计,每天可以节省燃油1.8 t。

3) 本文给出的加气输送下绞吸船工艺参数优

化策略可以实现节能减排,且其设备投入成本较低,可复制性强,具有良好的应用前景和经济效益。

4) 现场试验数据表明, DN850 管径加气对输砂工况效果并不显著。加气减阻可适用于 DN300~DN850 口径的排泥管,但对更大管径的效果还有待进一步验证。同时,为适用于超长排距的增压减阻,需要解决管道内气体排出的难题,建议在管道内布置真空阀门,自动泄气,可在后续的应用过程中进一步完善。

参考文献:

- [1] 施宝林, 杨增海, 袁超哲, 等. 疏浚排泥管在不同管道组合下的输送摩阻分析[J]. 水运工程, 2022(8): 197-200.
SHI B L, YANG Z H, YUAN C Z, et al. Analysis of friction resistance of dredging pipe under different pipe combinations[J]. Port & waterway engineering, 2022(8): 197-200.
- [2] 汤勃, 孔建益, 侯宇, 等. 三相流管道输送技术研究[J]. 武汉科技大学学报, 2009, 32(1): 98-101.
TANG B, KONG J Y, HOU Y, et al. Transportation of tri-phase liquid in pipeline[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2009, 32(1): 98-101.
- [3] 曹凯飞, 杨捷, 王盛, 等. 加气压力对管道输送特性影响的数值模拟研究[C]//第五届全国浆体浓缩与管道输送技术和装备研讨会论文集. 北京: 中国金属学会, 2023: 68-72.
CAO K F, YANG J, WANG S, et al. Numerical simulation of characteristics of pipeline transportation under different air pressure [C]//Proceedings of the 5th National Symposium on Slurry Concentration and Pipeline Transportation Technology and Equipment. Beijing: The Chinese Society for Metals, 2023: 68-72.
- [4] 熊庭, 范世东, 朱汉华, 等. 疏浚管道加气输送阻力特性研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2011, 35(3): 554-557.
XIONG T, FAN S D, ZHU H H, et al. Study on resistance characteristic by gas injection for slurry in dredger pipelines[J]. Journal of Wuhan University of Technology (transportation science & engineering), 2011, 35(3): 554-557.
- [5] 蔡勇. 疏浚船加气减阻装置结构优化与特性参数研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
CAI Y. Study on structure optimization and characteristic parameters of gas-aided conveying device dredging ship[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013.
- [6] 汤勃, 孔建益, 饶润生. 管道气体助送的加气装置试验研究[J]. 机械设计与制造, 2011(6): 152-154.
TANG B, KONG J Y, RAO R S. Experimental research on air-ejecting device for pipeline air transportation [J]. Machinery design & manufacture, 2011(6): 152-154.
- [7] 于利伟, 朱汉华, 钟骏杰, 等. 绞吸式挖泥船加气输送试验系统设计与数据分析[J]. 交通与计算机, 2006, 24(4): 101-104.
YU L W, ZHU H H, ZHONG J J, et al. Design and statistic analysis of twist-inhale dredger gasification and transportation experiment system [J]. Computer and communications, 2006, 24(4): 101-104.
- [8] 熊庭. 绞吸式挖泥船管道加气输送技术研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
XIONG T. Study on gas-injected transportation technology of cutter suction dredger[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011.
- [9] 林煜, 袁宝来, 赵志赫. 厦门马銮湾疏浚排泥管道注气输送技术[J]. 水运工程, 2019(S2): 74-77.
LIN Y, YUAN B L, ZHAO Z H. Technology of dredging pipeline's air-injected transportation in Maluan Bay, Xiamen [J]. Port & waterway engineering, 2019 (S2): 74-77.
- [10] 李盼盼, 骆佳成, 袁超哲, 等. 环保绞吸船管道输送加气增排技术现场试验研究及能效分析[J]. 中国港湾建设, 2023, 43(2): 89-95.
LI P P, LUO J C, YUAN C Z, et al. Field experimental study and efficiency analysis on gas injection technology boosting discharge distance of pipeline transportation of environment-friendly cutter suction dredger [J]. China harbour engineering, 2023, 43(2): 89-95.
- [11] 肖建, 曹凯飞, 骆佳成, 等. 小口径排泥管输送加气技术现场试验研究[J]. 水运工程, 2022(11): 227-231, 239.
XIAO J, CAO K F, LUO J C, et al. Field test of aeration technology for small-diameter dredging pipe transportation [J]. Port & waterway engineering, 2022(11): 227-231, 239.