



大型耙吸挖泥船外海取砂装舱施工工艺优化

陈少军¹, 孙慧², 赵国权¹, 钟政¹, 吕玉棋²

(1. 中交上海航道局有限公司, 上海 200002;

2. 中交疏浚技术装备国家工程研究中心有限公司, 上海 200082)

摘要: 针对厦门机场二期工程大型耙吸挖泥船外海取砂工效提升的目标, 通过分析不同采砂区装舱溢流土质特性和现有取砂工艺问题, 总结导致不同采砂区取砂装舱施工效率降低的主要原因, 提出针对不同土质特性的外海取砂装舱施工优化工艺, 并经实船测试和应用。结果表明, 不同土质的取砂装舱工艺存在差异, 对于易沉积、溢流损失小的土质条件, 提升舱内平整度能够有效增加装舱土方量; 对于难沉积、溢流损失大的土质条件, 提升挖泥能力是提高取砂装舱效率的重要手段。

关键词: 大型耙吸挖泥船; 外海取砂; 装舱施工; 工艺优化

中图分类号: U615.351

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)05-0226-05

Technology optimization for sand extraction and loading construction in open sea by large trailing suction hopper dredger

CHEN Shaojun¹, SUN Hui², ZHAO Guoquan¹, ZHONG Zheng¹, LYU Yuqi²

(1. CCCC Shanghai Dredging Co., Ltd., Shanghai 200002, China;

2. CCCC National Engineering Research Center of Dredging Technology and Equipment Co., Ltd., Shanghai 200082, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of sand extraction in the open sea by large trailing suction hopper dredger in Xiamen Airport phase II project, we analyze soil characteristics of loading and overflow in different sand extraction areas and existing loading construction problems, and summarize main reasons for the reduction of construction efficiency in different sand extraction areas. Then we propose the optimization technology of sand extraction and loading construction in open sea according to different soil characteristics, which is verified and applied by the on-board test. The results show that there are differences in the sand extraction and loading technology of different soils. For the soil condition with easy deposition and small overflow loss, improving the flatness of cabin can effectively increase the loading soil volume. For the soil condition with difficult deposition and large overflow loss, promoting the ability of excavation is an important mean to improve the efficiency of sand extraction and loading.

Keywords: large trailing suction hopper dredger; sand extraction in open sea; loading construction; technology optimization

随着国内外经济的快速发展和吹填造地需求的增长, 河砂和近海砂源已经无法满足大型吹填工程的需要, 耙吸挖泥船在深海取砂成为沿海重大吹填工程的重要施工方式, 具有广阔的市场

前景^[1-2]。目前国外大型疏浚公司承揽深海取砂工程较多, 相关施工工艺技术较成熟, 施工效率较高且稳定, 但是关键工艺技术并不对外报道; 与之相比, 国内相关工程施工方式和工艺调整多

收稿日期: 2023-09-07

作者简介: 陈少军 (1984—), 男, 高级工程师, 从事航道疏浚及陆域形成方面的研究。

以施工摸索等经验为主, 面对实际工程中不同施工条件和要求, 不同耙吸挖泥船之间的施工效率差异较大, 且现有研究主要针对如挖深超出常规施工船舶工作条件、硬质土质等异常工况, 多从施工方案对比优选、疏浚关键设备的改造和性能提升、自动化系统优化以及施工管理等角度入手, 现有研究方法和技术成果较少且不具备普适性^[3-6]。因此, 本文针对厦门大小嶝造地工程(约9.81 km²)陆域形成及地基8.23 km²造地I标段(简称“厦门机场二期工程”)存在的极限挖深条件下取砂施工效率大幅降低、不同土质特性取砂装舱效率差异大的难点, 在原有耙吸船设备性能不变的基础上, 通过施工数据分析、数值模拟和现场试验方法, 从挖泥、吸泥和装舱主要技术要点提出相关工艺优化的建议, 为耙吸船取砂装舱工效提升提供技术支持。

1 工程概况

厦门机场二期工程采用多艘万方等级大型耙吸船从A和B采砂区取砂后运至储砂坑抛砂、由绞吸船吹砂至陆域形成区域的施工工艺, 预计取砂量9 500万m³, 供砂时间约18个月, 运距约55 km, 工程位置见图1, 耙吸船工艺流程见图2。

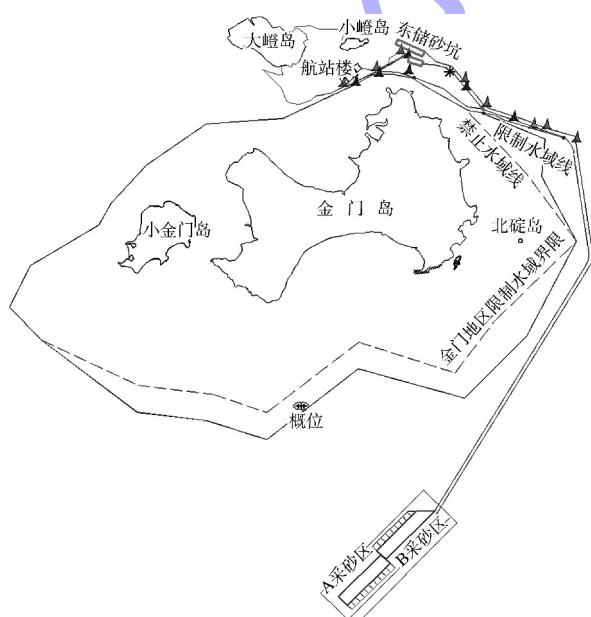


图1 厦门机场二期工程位置

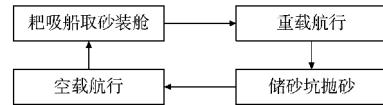


图2 耙吸船取砂施工工艺流程

取砂区位于福建省厦门湾口东南海域, 因处于开阔海域, 受风浪影响大, 冬季以北至东北风为主, 风浪以东向为主, 每年3—9月风浪相对较小。

由钻孔资料显示, 按照JTS 181-5—2012《疏浚与吹填工程设计规范》^[7]的疏浚土质分类方法, A采砂区以中粗砂为主, 砂质含量80%~95%, 泥质含量占3%~15%, 其中粒径在0.30~2.36 mm的砂质量平均占比为76.74%。与A采砂区相比, B采砂区土质更细, 粒径在0.30~2.36 mm的砂质量平均占比为60.72%。

2 工程难点

1) 耙吸船因装舱不平衡导致在重载时艏倾且吃水差较大, 这不但会降低航速、增大油耗、降低船舶的操纵性, 更会降低装舱效率。

2) 在实际挖深与最大挖深比值超出90%以上的接近极限挖深条件下, 耙吸船取砂效率降低。一方面, 对于不具备完好耙头高压冲水功能的耙吸船, 取砂区下层以中细砂、细粉砂混淤泥土质为主的取砂密度明显比上层以中粗砂类和淤泥为主的密度低; 另一方面, 水下地形高差大或存在多处垄沟, 波浪补偿器补偿不到位导致耙头时常脱离泥面, 降低挖泥效率。

3) 以细粉砂混淤泥土为主的B采砂区下层, 溢流损失明显增大, 装舱效率大幅降低。与中粗砂、中细砂混淤泥质土相比, 粉细砂混淤泥质土在进入泥舱后难以快速沉积下来, 装舱溢流时间延长0.5~1.0 h, 每船次装载土方量降低200~500 m³。

3 取砂装舱施工工艺问题分析

3.1 装舱溢流土质取样及装舱溢流特点

不同特性的土质会显著影响耙吸船取砂装舱施工效率。因此, 为了解和掌握A、B采砂区下层

土质特性，依托某耙吸船开展不同采砂区装舱溢流取样及装舱溢流特点分析。在耙吸挖泥船装舱未溢流期间，利用取样筒在前进舱左侧消能箱取样；在发生溢流后，定时调整进舱工艺并利用取样筒在左侧溢流筒取样。共取样 9 次，通过测量取样泥浆体积和质量换算实测密度，并将其与船载密度计数据进行对比较核密度数据的有效性。

取样结果见图 3。可以看出，A 采砂区土质以中细砂为主，B 采砂区土质以粉细砂混淤泥质土为主。不同采砂区土质装舱和溢流密度见图 4。可以看出，A 采砂区土质进舱密度 1.14 t/m^3 、溢流密度 1.04 t/m^3 ，说明 A 采砂区土质较易沉积，溢流损失小，但取砂施工结束后船舶并未达到满载吃水状态，因此对于 A 采砂区，宜从优化装舱溢流工艺角度提高取砂装舱效率；对于 B 采砂区，土质进舱密度 1.13 t/m^3 、溢流密度 1.08 t/m^3 ，且溢流密度随溢流时间增加而不断增大，不同进舱工艺方式溢流密度差异不大，这表明 B 采砂区土质溢流损失较大，装舱溢流调整效果不明显，应重点从提高挖掘性能的角度提高施工效率。



a) A 采砂区



b) B 采砂区

图 3 不同采砂区土质取样结果

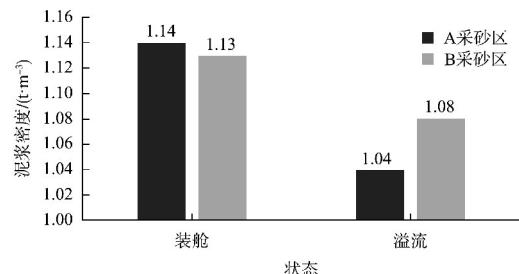


图 4 不同采砂区平均装舱密度和溢流密度

3.2 现有取砂装舱工艺问题

为进一步寻找导致现阶段耙吸船取砂装舱工效降低的原因，统计某耙吸船取砂装舱施工关键参数和施工数据，对其存在的主要工艺问题分析如下。

1) 局部区域波浪补偿器不到位造成耙头不接地。波浪补偿器基于恒张力原理，在风浪或海底不平整情况下补偿行程，确保耙头保持贴地状态。厦门机场二期工程取砂区位于外海开阔海域，风浪流海况较差，且局部区域的海底泥面高差较大，当波浪补偿器行程不足以弥补波浪和泥面高差带来的影响会造成耙头不接地，从而大幅降低取砂效率。

2) 无有效耙头高压冲水辅助挖泥。对于中细砂、粉砂等坚硬土质，耙头高压冲水通过冲刷底床泥沙并向切削土体膨胀区补水降低泥沙颗粒之间的孔隙负压，从而减小耙齿切削阻力、提高耙齿破土能力，进一步使得切削土体更容易被吸入耙头，与使用高压冲水相对应的操作应是低航速、高压冲水喷嘴贴近泥面。针对厦门机场二期工程取砂区下层以中细砂、细粉砂混淤泥为主的土质条件，不具备正常耙头高压冲水功能的某耙吸船的取砂密度明显低于开启高压冲水的相同等级耙吸船。

3) 局部区域装舱密度过低造成舱内泥浆稀释。耙吸船施工到取砂区下层时，局部区域进舱密度过低，稀释舱内泥浆密度，大幅增加溢流时间。因此，应避开挖掘浓度较低的区域和开启低浓度排放，从而有效节约装舱时间、提高装舱效率。

4) 不同特性土质条件下采用相同装舱工艺导致装舱效率降低。不同土质因装舱溢流特性不同, 装舱工艺调控会直接影响溢流损失和装舱效率。其中进舱方式主要包括前后同时进舱、后进舱和前进舱3种方式。前后同时进舱与后两者方式相比, 出流泥浆流速因出流面积增大而降低, 舱内水砂混合物受到的扰动减少, 更有利于泥沙沉积。与前进舱方式相比, 后进舱方式通过增加进舱泥浆与溢流筒水平距离而提高泥沙溢流出去的难度。溢流筒高度可在一定范围内自由升降, 整体来讲, 溢流筒越高, 舱内水砂混合物装载量越大、溢流损失就越小。

因此, 耙吸船应根据不同土质特性匹配对应的装舱溢流工艺, 才能合理降低溢流损失、提高装舱效率。

4 取砂装舱施工工艺优化

1) 加强波浪补偿器控制, 提高有效吸泥能力。经施工数据统计对比分析, 发现耙吸船从取砂区上层施工至接近极限挖深时, 取砂区存在多处垄沟, 同一船次泥面高差波动范围由5~6 m增加至8~10 m, 波浪补偿器行程低于0.2 m的施工时间(不包括船舶转弯)由0~4 min增加至10~30 min, 波浪补偿器行程由0.4~0.5 m增加至0.8~1.0 m, 但是对应耙头行程达到最大值的时间段取砂密度较低, 这表明该时间段波浪补偿器行程无法满足耙头有效贴合泥面的需求, 导致吸泥能力降低。因此, 针对风浪影响较大的恶劣天气以及泥面高差较大的垄沟区域, 在某耙吸船最大波浪补偿器最大行程为3 m的前提下, 建议将波浪补偿器行程控制范围增加至不低于施工过程中波高或垄沟高差的最大值的一半, 经实船应用证明将波浪补偿器行程控制范围由0.8 m提高至1.2 m可有效降低补偿器无效工作时间、提高取砂密度的平均水平。

2) 增加耙头高压冲水, 提高挖泥能力。基于有无耙头高压冲水的2艘耙吸船对中细砂、细粉砂混淤泥为主的破土效果对比, 建议耙吸挖泥船在耙头高压冲水功能完好的基础上, 针对取砂区

下层以中细砂、细粉砂混淤泥为主的土质条件, 开启不低于1.2 MPa的耙头高压冲水, 同时尽可能降低对地航速至1 kn左右以及尽量使耙头本体高压冲水喷口与泥面接近垂直。

3) 使用低浓度排放, 降低溢流损失。基于装舱溢流时间随进舱密度降低而增加的施工数据统计结果, 建议将密度低于1.05 t/m³的泥浆直接排出舷外, 从而降低溢流损失、提高装舱效率。

4) 采用优化装舱溢流工艺, 提升装舱效率。采用基于流体和泥沙运动理论的流体动力学(CFD)数值模拟方法^[8-9], 建立某大型耙吸船装舱溢流过程数值模型, 见图5。典型工况下装舱溢流模拟并与实船测试土方量分析对比见表1。可以看出, 对于A采砂区易沉积的中细砂混淤泥质土, 在相同装舱时间条件下, 采用3阶段进舱控制工艺土方量最大, 采用分阶段分层降低溢流筒高度控制工艺比一次性大幅降低溢流筒工艺的土方量大; 对于B采砂区较难沉积的粉细砂混淤泥质土, 不同进舱控制工艺土方量差异不大, 采用分阶段分层降低溢流筒高度控制工艺比一次性大幅降低溢流筒工艺的土方量大。

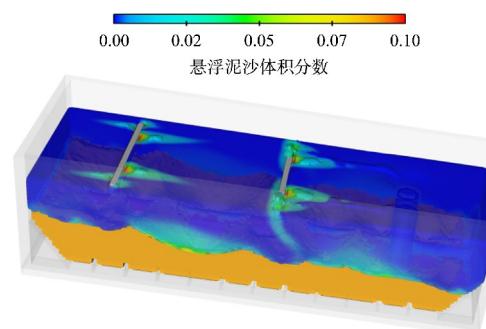


图5 耙吸挖泥船装舱溢流数值模拟

表1 不同采砂区进舱、溢流控制工艺对比

状态	控制工艺	相对土方量	
		A采砂区	B采砂区
1阶段:后进舱		0.92	0.99
2阶段:前后进舱→后进舱		1.00	1.00
3阶段:前后进舱→前进舱→后进舱		1.04	—
1阶段:溢流筒一次性降低至满载吃水高度		1.00	1.00
2阶段:溢流筒分两次降低至满载吃水高度		1.01	1.01
3阶段:溢流筒分三次降低至满载吃水高度		1.01	1.02

综上所述,针对 A 采砂区易沉积的中细砂混淤泥质土,建议主要通过提升舱内平整度,采用 3 阶段进舱以及分阶段分层降低溢流筒高度的优化工艺;针对 B 采砂区较难沉积的粉细砂混淤泥质土,建议主要通过提高挖掘能力,采用加强波浪补偿器控制、增加有效耙头高压冲水、低浓度排放以及分阶段分层降低溢流筒高度的优化工艺。

5 取砂装舱优化工艺工程应用效果

应用上述取砂装舱施工优化工艺至某耙吸船,跟踪并收集工艺优化前后的装舱效果见表 2。可以看出,耙吸船通过采用本文提出的优化工艺,有效增加土方量、提升装舱平整度和船舶重载航行性能,与工艺优化前相比,实测 A 和 B 采砂区土方量累积增加约 3.7 万 m³,船舶呈艉倾重载航行且艏艉吃水差基本保持在 0.5 m 以内。该优化工艺为厦门机场二期工程耙吸挖泥船取砂装舱安全高效施工和节约施工成本提供了关键技术支撑,针对其他类似工程同样具有很大的参考意义和推广应用价值。

表 2 工艺优化前后装舱效果对比分析

工况	采砂区	平均每船	平均每船	船次	累积土方量增量/万 m ³
		次实测土方量/m ³	次土方量增幅/%		
工艺调控前	A	9 276	-	100	-
工艺调控后	B	9 070	-	206	-
工艺调控后	A	9 437	1.74	100	1.61
工艺调控后	B	9 169	1.09	206	2.04

6 结语

1) 本文通过分析导致厦门机场二期工程耙吸挖泥船取砂装舱工效降低的原因,提出适用于不同土质特性的优化施工工艺。工程应用结果表明,该优化工艺有效提高了土方量,提升船舶重载航行性能,为厦门二期工程耙吸船安全高效取砂施工、节约施工成本提供技术支持,对于以后类似

工程也具有重要的参考意义和推广应用价值。

2) 建议针对易沉积、溢流损失小的取砂区主要通过提升舱内平整度提升工效,针对难沉积、溢流损失大的取砂区主要通过提升挖掘能力以提升工效。

3) 本工程耙吸船外海取砂工艺优化和工程应用结果表明,不同土质的装舱溢流工艺不能一概而论。因此,对于以后类似工程,建议通过典型工况取砂装舱测试并结合本成果的工艺优化方法,达到取砂效率提升的目标。

参考文献:

- [1] 王彦睿. 我国海砂资源开采法律规制研究[D]. 海口: 海南大学, 2022.
- [2] 吴永彬, 冯晨, 杨正军. 超大型耙吸船深远海取砂吹填施工工艺[J]. 中国港湾建设, 2019, 39(2): 55-59.
- [3] 董海宽. 超大型耙吸船深远海取砂吹填施工技术[J]. 中国水运(下半月), 2020, 20(1): 152-153.
- [4] 陈颖. 填海造地工程海砂开采工艺分析[J]. 江西建材, 2020(9): 183-184.
- [5] 李振强. 改造平板驳联合耙吸船装舱施工工艺探讨[J]. 港工技术, 2023, 60(2): 94-97.
- [6] 郑蔺, 孙春辉, 张基斌, 等. 广东汕尾海砂开采施工工艺研究[J]. 中国新技术新产品, 2022(24): 93-96.
- [7] 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 中交天津港航勘察设计研究院有限公司. 疏浚与吹填工程设计规范: JTS 181-5—2012[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
- [8] 郝宇驰, 洪国军, 王超. 耙吸挖泥船装舱溢流过程中非黏性泥沙沉积与冲刷的模拟[J]. 水运工程, 2012(12): 119-125.
- [9] SUN H, QU J M, TAO R, et al. Experiment and simulation of mobile underwater dredger fill in-layers technology in open water [C]//XU H Q. Proceedings of the 5th International Symposium on Water Resource and Environmental Management. Berlin: Springer, 2022: 357-370.

(本文编辑 王璁)