耙吸船走抛回填分层控制与参数优化研究*

汪楚亮[1]，喻明杰[1]，冀登辉[1]，罗　梁[1]，孟栋梁[2]
（1. 中交广州航道局有限公司，广东 广州 510290；2. 中交广州水运工程设计研究院有限公司，广东 广州 510290）

摘要：大型耙吸船在深厚软基区域实施回填时易出现层厚波动大、条带间覆盖不连续等问题。针对此工程需求，依托菲律宾帕赛回填工程的高精度 RTK-GNSS 航迹与多期多波束测深成果，构建分层走抛回填质量数据库，采用平均厚度、单位面积厚度、厚度变异系数和覆盖宽度等统计指标，系统分析泥门开度、船速与冲水量对回填厚度与均匀性的耦合影响，并归纳施工参数滚动调整原则。结果表明：在泥门开度 30%～50%、船速 1.2～1.8 kn、冲水量约 2 000 m^3/h 的控制窗口内，单层厚度稳定在 0.45～0.60 m，总厚度实测范围为 1.88～2.14 m，厚度变异系数普遍小于 0.12，最终施工面高程偏差控制在设计值±0.15 m 以内。研究明确了关键施工参数与回填厚度控制指标之间的定量关系，提出适用于深厚软基区域耙吸船分层走抛回填的参数优化区间与现场调控方法，可为同类型工程的工艺选型和施工质量评价提供技术依据。

关键词：耙吸船；走抛回填；分层控制；泥门开度；羽流沉降
中图分类号：U616　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2026)07-0224-09

Layered control and parameter optimization of moving discharge backfilling by a trailing suction hopper dredger

WANG Chuliang[1], YU Mingjie[1], JI Denghui[1], LUO Liang[1], MENG Dongliang[2]
(1. CCCC Guangzhou Dredging Co., Ltd., Guangzhou 510290, China;
2. CCCC Guangzhou Water Transport Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

Abstract: Large trailing suction hopper dredgers may experience pronounced layer-thickness fluctuations and discontinuous strip coverage when conducting backfilling over deep soft-soil foundations. To address this engineering problem, a quality database for layered sailing side-casting backfilling is established based on high-precision RTK-GNSS vessel tracks and multi-period multibeam bathymetric surveys from the Pasay backfilling project in the Philippines. Statistical indicators, including mean thickness, unit-area thickness, thickness coefficient of variation, and effective coverage width, are employed to systematically investigate the coupled effects of bottom-door opening, sailing speed, and flushing-water flow rate on backfilling thickness and uniformity, and to summarize adaptive rules for on-site parameter adjustment. The results show that within a practical control window with a bottom-door opening of 30% to 50%, a sailing speed of 1.2−1.8 kn, and a flushing water flow rate of approximately 2, 000 m^3/h, the single-layer thickness can be maintained at 0.45−0.60 m, the measured total thickness ranges from 1.88 to 2.14 m, the thickness coefficient of variation is generally below 0.12, and the final construction surface elevation deviation is controlled within ±0.15 m of the design value. This study clarifies the quantitative relationships between key operational parameters and backfilling thickness-control indicators, and proposes an optimized parameter window and an on-site control method for layered moving discharge backfilling by trailing suction hopper dredger over deep soft-soil foundations, providing technical support for process selection and construction quality assessment in similar projects.

Keywords: trailing suction hopper dredger(TSHD); moving discharge backfilling; layered control; bottom-door opening; sediment plume

收稿日期：2025-11-11　　**录用日期：**2025-12-17
***基金项目：**中交广州航道局有限公司《耙吸船走抛分层回填施工工艺研究》课题项目(KY-2023-015)
作者简介：汪楚亮(1983—)，男，高级工程师，研究方向为港口与航道工程、水运工程以及项目管理。

水运工程

近年来，部分大型耙吸挖泥船在围堤加固、软基处理和沉管基础回填中开始采用分层走抛回填工艺，将回填区划分为若干平行条带和分层网格，船舶以较小泥门开度和较低航速沿网格反复走抛，逐层形成薄层回填[1]。该工艺在国外近岸整治和围堤加高工程中已有零星应用，国内工程实践也逐步增多。本文所依托的菲律宾帕赛回填工程在软黏土地基、万吨级耙吸船和严格回填层厚偏差控制条件下，系统采用分层走抛工艺，并配套完整施工监测和数据整理，在同类工程中具有代表性。

既有工程实践表明，多数分层走抛回填的项目技术文件仅给出单层设计厚度及允许偏差，缺乏以平均厚度、厚度变异系数、覆盖率和超厚率等统计指标为基础的量化评价方法[2]；泥门开度、船舶航速和走抛间距等关键参数调整主要依赖经验，缺少可复用的定量关系[3]；工程实测资料零散，难以在工程尺度上刻画砂体沉降路径对参数变化的响应，也难以支撑数值模拟或物理试验的率定与验证[4]。

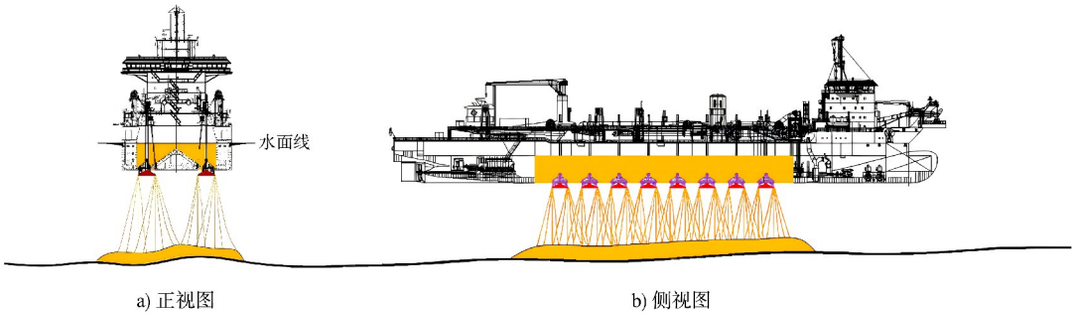
针对相关问题，Shao 等[5]通过三维工况模型评估释放位置、释放频率与推进器对溢流扩散的影响，提出采用前部溢流与低航速以减小表层羽流；Fernandes 等[6]将 TELEMAC-3D 与 SEDI-3D、TOMAWAC 耦合，对多处处置点进行长期序列仿真，构建悬沙羽流扩散与背景贡献量评估框架；Chaudhuri 等[7]提出耙吸船(trailing suction hopper dredger,TSHD)场地化挖泥效率指数，以多项产量指标优化维护疏浚计划。在施工工艺方面，赵宝帅等[8]利用铺砂驳封闭扩散式摊铺头与自动锚泊定位，实现≤0.5 m 的薄层均匀摊铺；罗文知[9]提出皮带砂船扇形法以稳定覆盖与厚度控制；柯秋锐等[10]结合港池潮流泥沙数学模型与工艺参数优化，缓解施工期回淤并提升清淤效率。

综上，现有研究多聚焦羽流扩散机理、远场影响或作业绩效评价，分层走抛条件下层厚与层面连续性的现场量化控制窗口尚不清晰，泥门开度与航速的组合优化多停留在经验层面，缺乏经工程验证且可推广的参数区间。基于此，以菲律宾帕赛耙吸船分层走抛回填为对象，依托高精度 RTK-GNSS 航迹和条带厚度实测数据，构建工程尺度回填质量数据库，对不同泥门开度、船舶航速和走抛节奏工况进行对比分析，建立将施工参数与平均厚度、厚度变异系数、覆盖率等统计指标相联系的质量评价方法，识别关键参数组合对沉降路径和条带均匀性的影响规律，并提出面向软基处理工程的参数控制区间以及现场调控建议。

1　分层走抛回填的工艺流程与测量方法

1.1　分层走抛回填施工流程

耙吸船分层走抛回填工艺通过船舶自主航行与泥门分组控制，实现砂体在软基上的多层薄层堆积，见图 1。施工过程主要包括：在砂源区取砂装舱并经溢流控制砂料纯度；装满后航行至回填区，依托 RTK/DGPS 精确定位，对准预设施工网格；按既定航速沿网格线匀速走抛，分段开启泥门抛撒砂料；泥沙在重力和水流作用下沉降于海床形成层状堆积；每层施工完成后开展测深复测与厚度反演，为下一层施工和参数调整提供依据。



a) 正视图　　b) 侧视图

图 1　耙吸船抛泥施工工艺示意

Fig. 1　Schematic of layered moving discharge backfilling process by a trailing suction hopper dredger

1.2 工程与施工条件

菲律宾帕赛项目回填区域位于马尼拉湾中部近岸水域，紧邻城市滨海商业区，规划通过吹填形成多个人工岛及其配套护岸与地基处理设施。工程回填方量大，对回填厚度精度与成层均匀性要求高。试验区位于中等水深海域，典型测试区回填前水深约为 12.4～13.2 m；海床表层广泛发育深厚软土层。勘察结果表明，软土主要为 SU1/SU2 粉质黏土，处于非常软至软状态，标贯击数多小于 2 击，含水率高、可压缩性强；表层约 2 m 范围内不排水抗剪强度约为 2 kPa，软土总厚度多数超过 10 m，局部可达 20 m。受软土沉降特性与承载能力约束，软基区域回填厚度控制以防止差异沉降与局部失稳为主，单层回填厚度宜控制在 0.30～0.65 m 范围内，同时厚度变异系数应控制在 0.20 以内，以保证层间厚度的均匀性与成层质量。

回填砂取自菲律宾 Bucao 砂源区。钻孔及室内试验显示，该区浅部沉积物以中粗砂为主，夹少量薄层粉土及卵石，粒径范围约 0.2～1.6 mm，含泥量普遍低于 10%；上部结构较为松散，下部呈中密至密实，砂层平均厚度约 45 m。该砂源可作为分层回填材料，便于在软基上形成高透水性、低可压缩性的砂垫层。工程采用一艘具备深水取砂与远距离输送能力的大型自航耙吸挖泥船承担取砂与走抛回填作业。船舶总长约 170 m、型宽约 31 m，最大舱容约 2.1×10^4 m^3，设计挖深可达 90 m，管吹输送距离约 3 000 m；船底布置多点对称泥门，单个泥门直径约 5 m。

1.3 现场测试方案与监测设备

为定量评价分层走抛回填工艺的厚度控制精度与空间均匀性，在典型试验区域内布设了一套一体化现场测试方案，围绕船舶走抛轨迹、泥沙排出过程和海床地形变化开展监测。测试方案通过施工前的基准地形测量、施工过程中的实时工况监测以及施工结束后的成果复测，连续记录回填区域的地形演变和相关参数。

船舶运行与空间定位方面，依托耙吸船导航系统和船载高精度 RTK-GNSS，对走抛过程中的船位、航向和航速进行连续记录，平面定位精度控制在厘米级；将实时航迹叠加到预设施工格网上，可精确还原各轮次走抛路径和节奏，用于分析理论格网、实际航迹与厚度分布之间的对应关系。海床地形与分层厚度方面，采用搭载多波束测深系统的测量船在各层施工前后实施全覆盖测深，结合声速与潮位改正并进行栅格化处理，构建分层施工前后的数字地形模型，通过相邻两期地形差分反演单层厚度和总厚度，并在典型纵横断面上提取厚度剖面，刻画层内厚度起伏与层间界面形态。

泥沙排出与回填产量方面，利用船载生产管理系统中泥舱吃水、泥泵功率和管线压力等运行参数，统计各轮走抛的装舱方量与排砂方量，并结合泥门开度、冲水压力和作业时间换算平均排砂流量与单位时间排砂量，将其与测深反演体积对比，从质量守恒角度交叉验证厚度反演结果。水动力条件方面，通过测量船断面流速观测与区域水文资料相结合获取施工窗口内的流向、流速范围及潮流主轴特征，用以解释不同走抛轮次中砂体羽流形态和堆积带外展范围的差异。

2 分层走抛回填质量关键影响因素分析

在耙吸船分层走抛回填中，泥门开度、船舶航速和冲水强度是决定单层厚度和覆盖均匀性的核心参数。结合菲律宾帕赛项目施工记录，选取 8 个具有代表性的分层走抛船次进行对比分析。各船次均取自同一砂源区中粗砂，泥舱装舱量控制在 1.8×10^4～2.1×10^4 m^3，单次走抛抛填量约 0.8×10^4～1.0×10^4 m^3，单条带走抛行程约 900～1 100 m，网格间距一致。测试时段回填前水深为 12.4～13.2 m，作业期间表层及中层流速主要为 0.20～0.35 m/s。

为定量评价分层走抛回填质量，以多期测深

反演得到的厚度栅格为基础，引入平均回填厚度、抛填砂覆盖宽度、单位面积回填厚度、厚度变异系数和最大回填厚度等统计指标。

对于某一走抛条带，平均回填厚度定义为有效测点厚度的算术平均值：

$$\bar{h} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} h_i \tag{1}$$

式中：$\bar{h}$ 为平均回填厚度；N 为有效测点数；h_i 为第 i 个测点的厚度。

覆盖宽度定义为厚度连续大于给定阈值的区域在垂直于走抛方向上的宽度，研究根据设计单层厚度和测深精度，将厚度阈值取为 0.10 m，用以剔除零星薄层沉积和噪声干扰。单位面积回填厚度通过回填体积与有效覆盖面积之比进行计算，其中回填体积由厚度栅格积分得到，有效覆盖面积由覆盖宽度与走抛有效长度相乘得到。

厚度变异系数表征条带内厚度起伏程度，定义为厚度标准差与平均厚度之比：

$$C_v = \sigma_h / \bar{h} \tag{2}$$

式中：C_v 为厚度变异系数；σ_h 为厚度标准差，用以反映厚度均匀性。

最大回填厚度取自厚度栅格中非零区域的最大值，用于识别局部过厚堆积对后续工序的潜在不利影响。研究采用基于厚度阈值的有效覆盖宽度定义，在剔除无效区域的同时保留受砂体影响的有效范围，以提高平均厚度与单位面积厚度指标的代表性。

2.1　泥门开度对厚度与扩散范围的影响

泥门开度直接决定单位时间排砂量和初始动量，是影响水平扩散宽度与纵向堆积厚度的首要参数。同一开度条件下，不同走抛船次的平均回填厚度和覆盖宽度虽有一定波动，但明显小于不同开度之间的差异，具有良好的可比性，见表 1。

低开度时，砂体射流集中、沉降路径短，易形成较厚而相对集中的沉积条带，适用于水深较浅或需严格控制堆积形态的区域；高开度虽可显著增大覆盖宽度，但沉降路径拉长，细颗粒更易被剪切带走，边缘厚度减薄、厚度波动加大。综合厚度精度与作业覆盖度，工程应用中宜在“中心较厚、边缘平滑衰减”和施工效率之间折中，一般将泥门开度控制在 30%～50%之间较为合理。

表 1　泥门开度对厚度与扩散范围的实测数据

Tab. 1　Measured data on backfilling thickness and coverage width under different bottom-door openings

船次	平均航速/kn	冲水流量/($m^3 \cdot h^{-1}$)	泥门开度/%	平均回填厚度/m	抛填砂覆盖宽度/m
1	1.5	2 000	22	0.521	42.1
2	1.5	2 000	22	0.518	41.9
3	1.5	2 000	22	0.521	41.7
4	1.5	2 000	50	0.473	50.3
5	1.5	2 000	50	0.467	49.8
6	1.5	2 000	50	0.469	50.0
7	1.5	2 000	100	0.394	65.2
8	1.5	2 000	100	0.388	65.3

2.2　船速对沉积均匀性与厚度波动的影响

船舶在回填区的匀速航行是实现分层均匀堆积的前提，从体积守恒看，在泥门开度和排砂工况基本稳定时，抛填产量主要由管线排砂流量决定，航速变化对单位时间的排砂量影响有限。在相同船速条件下，不同船次的抛填产量和覆盖宽度差异主要由有效抛填时间占比、潮流条件以及泥门启闭节奏等因素共同作用，相关数据见表 2。

表 2　船速对沉积均匀性与厚度波动的实测数据

Tab. 2　Measured data on deposition uniformity and thickness fluctuations under different sailing speeds

船次	泥门开度/%	冲水流量/($m^3 \cdot h^{-1}$)	平均航速/kn	单位面积回填厚度/m	厚度变异系数
1	50	2 000	1.0	0.60	0.10
2	50	2 000	1.2	0.50	0.11
3	50	2 000	1.4	0.44	0.12
4	50	2 000	1.6	0.39	0.13
5	50	2 000	1.8	0.34	0.15
6	50	2 000	2.0	0.30	0.14
7	50	2 000	2.2	0.27	0.17
8	50	2 000	2.5	0.25	0.16

在泥门开度与冲水流量不变条件下，船速由 1.0 kn 增至 2.5 kn 时，单位面积回填厚度由约

水运工程

0.61 m 降至约 0.33 m，厚度变异系数显著升高。速度过快会缩短单点停留时间，砂体尚未沉降即被推进下一区域，易形成拖尾式薄层，表现为条带尾部厚度不足、厚度起伏频繁；速度过慢虽有利于增加局部厚度，但单位时间覆盖面积下降、施工效率降低，且长时间沉降可能引起底层扰动。综合效率与厚度精度，船速宜控制在 1.2～1.8 kn 之间，在水深充足、流速平稳的区域可适度上调。

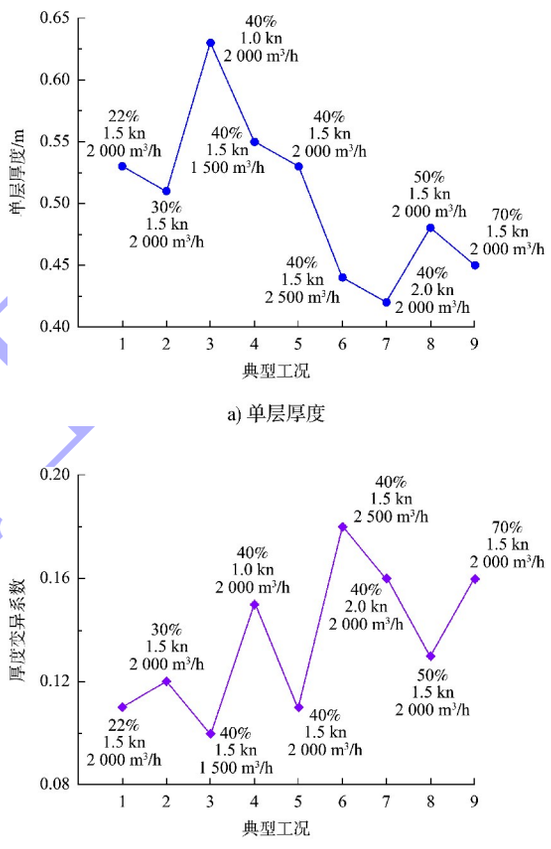
2.3　冲水强度对泥沙流动性的调节作用

冲水系统在回填过程中的作用主要体现在 3 个方面：1)增强泥沙排出时的流动性，避免高密度砂体在泥门附近堆积堵塞；2)提高泥沙在水中的初始动能，扩大扩散范围；3)稀释黏性物质，提高均匀性。施工记录表明，冲水流量主要在 1 500～2 500 m^3/h 范围内调整，该区间内排砂过程稳定性更高，可降低泥门附近堆积堵塞风险。

但冲水强度过大亦会导致砂体浓度下降，堆积密度减小，单位面积厚度下降，且增加水体扰动，形成边界羽流。因此，冲水应作为辅助变量，配合泥门开度与船速进行调节，在颗粒流动性不足或泥门开度偏小时提升冲水量，在浓度过低或扩散过广时适当削减。

2.4　参数组合对回填效果的耦合影响

在泥门开度较小、航速适中、冲水强度中等的组合工况下，单层厚度集中分布在设计值附近，厚度波动区间较窄；当开度或航速取较高值时，厚度分布上下界被明显拉开，局部偏薄与偏厚并存，见图 2a)。中等开度和中等航速对应的厚度变异系数相应地处于低谷，而偏大开度或偏高航速工况下变异系数明显升高，条带内厚度起伏加剧、均匀性下降，见图 2b)。在保持船速与冲水量基本不变的条件下，泥门开度由 22%逐步增至 70%时，单轮平均厚度整体呈下降趋势，而覆盖宽度逐渐增大，说明增大开度有利于扩大覆盖范围，但会牺牲部分厚度稳定性。在泥门开度固定且冲水量不变的条件下，船速由 1.0 kn 提高到 2.0 kn 时，单位面积回填厚度明显减小、厚度变异系数升高，高航速工况下条带尾部变薄、厚度起伏加大。由此可见，当泥门开度或航速分别向高值侧调整时，都会导致厚度波动加剧；处于上述区间中段的中等开度和中等航速组合，则在单层厚度、覆盖范围与厚度均匀性之间形成了较为平衡的状态。



a) 单层厚度

b) 厚度变异系数

图 2　典型参数组合下的施工效果

Fig. 2　Construction performance under typical parameter combinations

结合工程约束，帕赛试验区总厚度设计为 2.0 m，分 4 层施工，每层目标厚度约 0.5 m，施工水深 12.4～13.2 m，软基厚、沉降控制要求较严。在此背景下，宜将泥门开度控制在 30%～50%，船速控制在 1.2～1.8 kn，冲水量约 2 000 m^3/h，使单层厚度稳定在 0.45～0.60 m 之间，厚度变异系数一般小于 0.12，覆盖宽度与施工格网重叠关系合理。从软基回填需求看，上述组合能够将单层厚

度控制在设计目标附近，并显著降低厚度离散性，减少局部超厚与薄弱带，有利于抑制差异沉降并提高沉降响应的空间均匀性，满足软基回填对分层厚度稳定性与沉降控制的要求。

实际施工中，泥门开度、船速和冲水流量的调整应在推荐参数范围内进行，确保满足软基回填对厚度控制、均匀性以及沉降稳定性的要求，同时还需根据实时监测数据对施工参数进行动态调整，实现闭环控制。当连续条带平均厚度偏低且变异系数较小、条带间无明显空白带时，优先小幅降低船速或减小走抛间距，提高单位面积厚度，而不宜直接大幅增大开度，以免羽流过宽导致边缘变薄和细颗粒流失；当出现局部超厚、变异系数升高或条带边缘拖尾明显时，优先减小泥门开度或略微提高船速，必要时适当降低冲水量，削弱初始动量和羽流扩散强度，使厚度分布回归目标区间。在潮流突变、水深减小或靠近结构物等敏感工况下，在不超出窗口前提下将参数向保守侧调整，通过降低船速、采用中小开度和适中冲水强度换取更高的厚度均匀性和基底安全裕度。

2.5　泥沙沉降过程的动力学特征与量纲分析

帕赛项目典型工况下，耙吸船分层走抛回填可近似分为 3 个连续阶段：泥沙经泥门排出形成高动能射流，射流在水体中演变为高浓度羽流并随周围水流扩散，砂体在重力作用下沉降着床形成堆积体，泥门开度、船速和冲水强度共同控制上述过程的强度和尺度。

为刻画沉降阶段条带尺度的量级关系，引入特征时间尺度与无量纲比值进行量纲分析，定义颗粒沉降特征时间 t_s 为：

$$t_s = H/w_s \tag{3}$$

式中：H 为水深；w_s 为代表性颗粒沉速。

沉降期间沿航向平移尺度 L_s 与横向平移尺度 L_c 分别为：

$$\begin{cases} L_s = U_s t_s \\ L_c = U_c t_s \end{cases} \tag{4}$$

式中：U_S 为船舶航向速度；U_c 为背景流速。

进一步定义无量纲平移比：

$$\begin{cases} \Pi_s = L_s/H = U_s/w_s \\ \Pi_c = L_c/H = U_c/w_s \end{cases} \tag{5}$$

采用无量纲平移比，以衡量沉降过程中沿程拖移与横向外展相对于水深的强弱。该工程 $H = 12 \sim 13$ m、$w_s = 0.15 \sim 0.25$ m/s、$U_s = 0.51 \sim 1.03$ m/s（1.0～2.0 kn）及 $U_c = 0.20 \sim 0.35$ m/s 估算，t_S 约为 50～80 s，L_s 约为 25～80 m，L_c 约为 10～30 m，与实测条带尺度同量级。基于上述量级关系，分别从排出、扩散-沉降及最终堆积 3 个阶段讨论泥门开度、船速与冲水强度的作用路径。

排出阶段的关键在于射流初始动量与掺混强度，它们决定羽流的初始扩散尺度，并通过改变有效水平输运速度影响 Π_c 的量级与边缘外展趋势。当开度由 22%逐步增至 70%时，排砂流量与动量通量同步增大，相应的雷诺数和密度弗劳德数提高，射流的垂向贯入深度和横向扩散宽度均明显增加。低开度下射流较为集中、失速较快，砂体在门口附近即可进入沉降阶段，易在船舶航迹附近形成中心较厚、向两侧平滑衰减的堆积带；随着开度增大，射流剪切与掺混作用增强，细颗粒更易被携带至上层水体或羽流边界，扩散范围扩大会伴随条带边缘厚度减薄和厚度波动加大。

进入扩散与沉降阶段，条带沿程拖移主要受 $\Pi_s = U_s/w_s$ 控制：Π_s 增大意味着沉降期间航向位移增大，拖尾薄层更显著，厚度变异系数随之升高。以典型水深和粒径估算，单粒沉降时间约为数十秒量级，而在试验工况范围内船舶以 1.0～2.0 kn 匀速前进时，粒子在沉降期间沿航向的水平位移可达数十米，从而形成条带状堆积。船速升高会缩短单点作用时间，尚未沉降的砂体被连续拖移，形成拖尾式薄层，厚度变异系数升高；船速控制在 1.2～1.8 kn 时，沉降时间与单点作用

时间相匹配，可兼顾厚度与均匀性。

在最终堆积阶段，条带几何尺度（L_s、L_c）与施工网格重叠关系共同决定层面连续性；当 Π_s、Π_c 处于适中范围并配合合理重叠时，条带交界可实现厚度等值线平滑过渡。适中的泥门开度（30%～50%）、中等船速（1.2～1.8 kn）和约 2 000 m^3/h 冲水强度，使射流既具有足够动量形成连续条带，又不至于过度稀释、降低沉降效率。以水深 12～13 m 和粒径 0.2～1.6 mm 中粗砂为例，经验公式估算单粒沉速约 0.15～0.25 m/s，对应沉降时间约 50～80 s；在 1.2～1.8 kn 航速下，砂粒在沉降过程中沿航向水平位移约 30～70 m，与实测条带尺度基本一致。背景流速约 0.20～0.35 m/s 时，细颗粒被掺混入上层水体后沿潮流进一步迁移，当泥门开度或航速向高值侧调整时，覆盖宽度虽有所放大，但厚度变异系数和潜在流失率也随之升高。

3　工程实测与结果分析

为验证分层走抛回填工艺的厚度控制精度与实际效果，选取菲律宾帕赛项目中的典型施工区域作为验证区，见图 3，沙质回填试验区为本文研究的主要测试区域，淤泥质试验区仅用于示意位置，后续分析仅聚焦沙质区。通过对比船舶装载方量、设计层厚、施工网格布设与测深断面等数据，分析施工计划与实测结果的一致性，并评估该工艺在实际海域环境下的适应性及厚度控制精度。

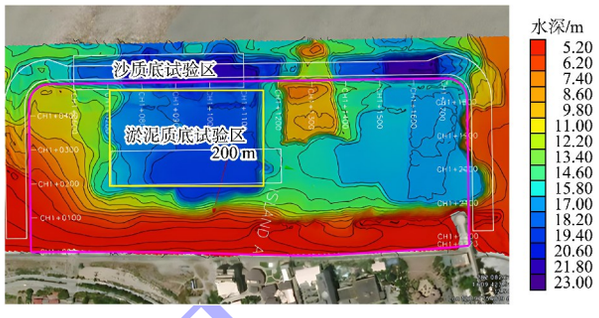


图 3　典型走抛回填施工区域

Fig. 3　Typical moving discharge backfilling construction area

3.1　施工网格布设与作业条件概况

实测区域回填面积约 160 m×60 m，设计总厚度 2.0 m，分 4 层走抛，每层目标厚度 0.5 m。按泥门开度 40%、冲水量 2 000 m^3/h、船速 1.5 kn 的组合，规划单轮走抛有效宽度 48 m、重叠宽度 8 m，共布设 4 条回填网格，见图 4，与前述推荐参数窗口相符。施工前水深为 12.4～13.2 m，底部软基厚、沉降风险较高，施工过程中以单层厚度目标为约束，结合走抛轨迹跟踪与泥门开度实时微调，对各层厚度及其空间分布进行动态控制。

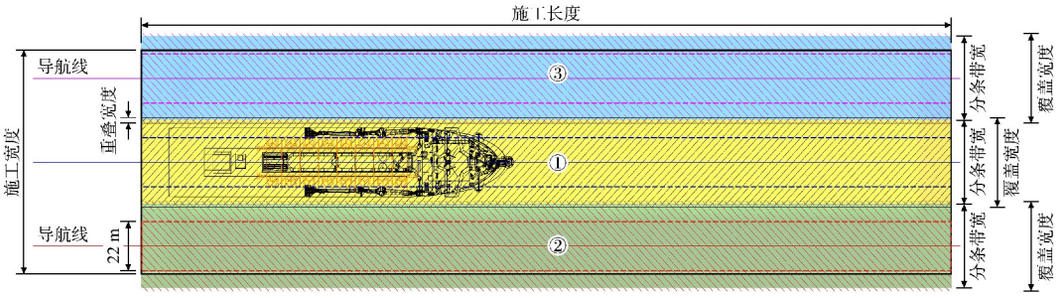


图 4　耙吸船走抛回填施工格网布设

Fig. 4　Construction grid layout for TSHD moving discharge backfilling

3.2　实测水深与厚度数据分布特征

回填完成后，通过多波束测深获取各层施工完成后的海床高程，并与施工前测深对比反演沉积厚度。施工前试验区水深为 12.4～13.2 m，原

始海床高程变化约 0. 8 m，见图 5。

第 1 层走抛完成后，厚度范围为 0. 42～0. 61 m，见图 6，平均厚度 0. 51 m，变异系数为 0. 096，边界略薄但未出现明显厚度跳跃。厚度大于 0. 50 m 的区域主要集中在约 160 m×40 m 的中部连续带状区，沿走抛方向分布连续；厚度 0. 42～0. 48 m 的相对薄层则主要出现在两侧各约 10 m 的边缘带，呈由中部向两侧逐渐减薄的趋势，抛填影响范围基本覆盖整个约 160 m×60 m 的试验区，与规划的 4 条走抛网格对应良好，边界清晰、无孤立堆积斑块。

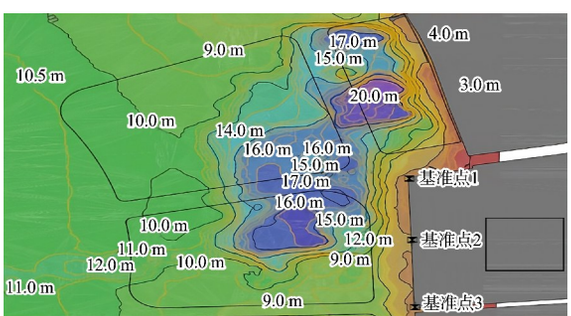


图 5　回填试验区施工前水深分布(以平均海平面为基面)

Fig. 5　Pre-construction water depth distribution in the backfilling test area (referenced to MSL)

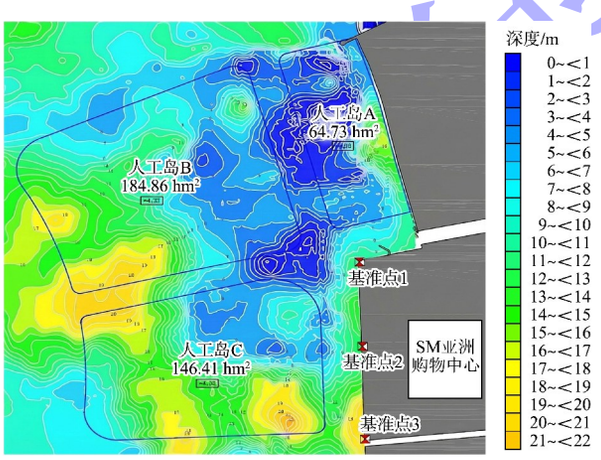


图 6　第 1 层淤泥层深度及厚度平面

Fig. 6　Plan of silt layer depth and thickness distribution for Layer 1

4 层施工完成后，总厚度在 2. 0 m 目标值附近波动，实测范围 1. 88～2. 14 m，平均 2. 01 m，厚度偏差不超过±0. 14 m(约±7%)，均满足施工精度要求。由此形成的最终施工面高程控制在目标高程附近±0. 15 m 以内，回填厚度控制精度与整体平整度表现出良好的一致性，两者相辅相成，确保施工质量。该工程以单层及总回填厚度偏差为主控指标，以施工后地面高程偏差为平整度辅控指标，通过厚度统计与高程检查综合评价施工质量。按厚度区间统计，试验区内总厚度在 1. 90～2. 10 m 的区域占据绝大部分面积，仅在局部边缘出现接近 1. 88 m 的薄层和接近 2. 14 m 的局部厚层，整体与 2. 0 m 设计厚度的偏差均不超过±0. 14 m。结合施工前后水深差异，回填后海床整体抬升约 2. 0 m；厚度平面分布连续、梯度变化平缓，条带之间未见明显厚薄断裂或堆积盲区，边缘重叠区呈平滑过渡，表明所采用的参数组合与网格布设能够满足连续覆盖与厚度控制要求。

3. 3　回填表面平整度与连续性分析

多层沉积界面清晰，厚度基本均匀，层间未见明显夹泥、反坡等异常，高程曲线在纵断面上大致平行，见图 7。单层厚度主要集中在 0. 45～0. 55 m，厚度等值线分布平顺，无突变折返；仅在局部边缘出现小范围减薄，未形成连续反坡或明显“尖瘦”薄层，表明分层走抛在垂向分层与平面均匀性方面保持良好的稳定性。多条纵横断面对比显示，地表高程变化控制在±0. 15 m 以内，表面平整度可满足后续压密处理或沉降观测需求，说明该走抛工艺既实现了层厚控制目标，又具有良好的沉积连续性和底面适应性，适合作为后续地基加固和结构基础施工的准备工序。

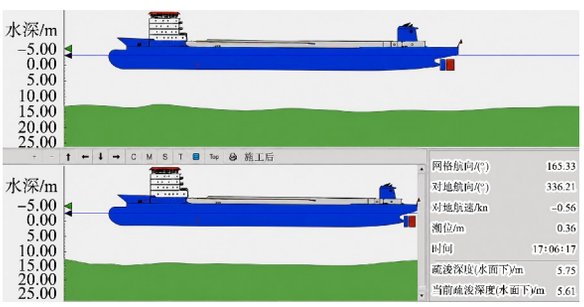


图 7　纵向施工断面

Fig. 7　Longitudinal construction section

4 结论

1）在泥门开度 30%～50%、船速 1.2～1.8 kn、冲水量约 2 000 m^3/h 的参数窗口内，通过对泥门开度、船速和走抛节奏进行匹配与滚动调整，可在满足单层设计厚度的同时，将厚度变异系数普遍控制在 0.12 以内，实现施工效率与层厚均匀性的平衡。

2）泥门开度决定排砂动量与覆盖宽度，船速控制单点停留时间与拖尾程度，冲水量影响流动性和掺混强度，三者耦合对回填效果具有主导作用。典型工况下，参数处于上述窗口中段时，厚度变异系数约为 0.10，条带内厚度起伏较小，均匀性较优。

3）工程验证表明，在深厚软基条件下分层走抛回填能够稳定实现总厚度设计目标，总回填厚度偏差控制在±7%以内，最终施工面高程偏差控制在±0.15 m 以内，厚度分布连续、无明显厚薄断裂带，表明该工法及参数控制思路具有较好的工程适用性和推广价值。

参考文献：

[1] FONIAS E N, VAN EEKELEN E, VAN DEN BOSCH B. Fine sediment dispersion in the addu-city dredging and reclamation project [J]. Journal of marine science and engineering, 2025, 13(3): 489.

[2] 唐国磊, 汪姣, 牛兴黎, 等. 耙吸式挖泥船疏浚施工组织仿真优化[J]. 水运工程, 2024(7): 193-200.
TANG G L, WANG J, NIU X L, et al. Simulation and optimization for dredging construction organization of trailing suction hopper dredger [J]. Port & waterway engineering, 2024(7): 193-200.

[3] 魏汉辉, 翟玉刚, 黎汉庭. 大型耙吸式挖泥船在浅水区疏浚工艺的应用[J]. 水运工程, 2021(2): 195-198.
WEI H H, ZHAI Y G, LI H T. Dredging method of large trailing suction hopper dredger in shallow water[J]. Port & waterway engineering, 2021(2): 195-198.

[4] 逯新星. 耙吸挖泥船艏吹钢圆筒及装驳工艺应用[J]. 水运工程, 2024(11): 221-226.
LU X X. Application of blow filling technology at steel cylinder and barge loading of TSHD[J]. Port & waterway engineering, 2024(11): 221-226.

[5] SHAO M Q, WANG J, DING X W. Research on overflow diffusion characteristics of dredger[J]. Journal of physics: conference series, 2020, 1600(1): 012003.

[6] FERNANDES E H, DA SILVA P D, GONÇALVES G A, et al. Dispersion plumes in open ocean disposal sites of dredged sediment[J]. Water, 2021, 13(6): 808.

[7] CHAUDHURI B, GHOSH A, YADAV B, et al. Evaluation of dredging efficiency indices of TSHDs deployed in a navigational channel leading to Haldia Dock Complex[J]. ISH journal of hydraulic engineering, 2022, 28(sup1): 471-479.

[8] 赵宝帅, 张健良. 铺砂驳分层回填工艺在大面积水下摊铺砂垫层项目的应用[J]. 中国港湾建设, 2022, 42(2): 10-14.
ZHAO B S, ZHANG J L. Application of layered filling technology of spreader pontoon in underwater large-area sand blanket paving project [J]. China harbour engineering, 2022, 42(2): 10-14.

[9] 罗文知. 皮带砂船扇形法分层回填施工工艺[J]. 珠江水运, 2025(7): 70-72.
LUO W Z. Construction technology of layer-by-layer backfilling by the fan-shaped method of belt sandboat[J]. Pearl River water transport, 2025(7): 70-72.

[10] 柯秋锐, 于亚南. 简析大铲湾码头港池的疏浚清淤施工[J]. 港口航道与近海工程, 2024, 61(5): 126-129.
KE Q R, YU Y N. Desilting and dredging of harbor basin at dachan bay terminal [J]. Port, waterway and offshore engineering, 2024, 61(5): 126-129.

（本文编辑 赵娟）

水运工程