



# 耙吸挖泥船艙吹钢圆筒及装驳工艺应用

逯新星

(中港疏浚有限公司, 上海 200120)

**摘要:** 针对钢圆筒围堰灌砂施工进度慢、外购砂成本大的问题, 采用耙吸船分流艙吹充填钢圆筒工艺, 实现一天成型4个钢圆筒, 施工效率比吹砂船提高5倍, 成本仅为吹砂船的1/4, 具有良好的技术价值和经济价值。同时, 采用耙吸船进行艙吹装驳施工, 保障了袋装砂供应, 解决了外购砂源不足及外购成本大的问题。耙吸挖泥船艙吹钢圆筒、装驳工艺在某工程的应用可保障工程进度和节约成本, 为耙吸挖泥船艙吹工艺的多功能运用提供借鉴。

**关键词:** 耙吸挖泥船; 艙吹工艺; 钢圆筒围堰; 装驳工艺

中图分类号: U616

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)11-0221-06

## Application of blow filling technology at steel cylinder and barge loading of TSHD

LU Xinxing

(CHEC Dredging Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of slow sand filling construction of steel cylinder cofferdam and high cost of purchased sand, this paper adopts blow filling technology of TSHD by the way in which multiple tubules disperse water flow filled steel cylinder cofferdam to form 4 steel cylinders in one day. The construction efficiency is 5 times higher than that of sand blowing ship, and the cost is only a quarter of that of sand blowing ship, which has good technical and economic value. At the same time, the construction process of loading barge is carried out by TSHD, which guarantees the supply of bagged sand and solves the problem of insufficient sand source and high cost of outsourcing. The application of blow filling technology at steel cylinder and barge loading of TSHD in M project can guarantee project progress and save cost, and provide reference for the multi-functional application of blow filling technology of TSHD.

**Keywords:** trailing suction hopper dredger (TSHD); blow filling technology; steel cylinder cofferdam; barge loading technology

耙吸挖泥船作为世界上先进的疏浚设备, 具有广泛的适应性和多样化的施工工艺, 常见的有旁通(边抛)工艺、装舱(装舱溢流)工艺、艙喷及艙吹工艺等<sup>[1]</sup>。上述工艺均为耙吸挖泥船的核心基础, 若在该类工艺上加以改进和创新, 则能适应更多工况环境, 如皮带船和耙吸挖泥船艙吹工艺的联合应用<sup>[2]</sup>、耙吸挖泥船与自航泥驳旁通装驳工艺的应用<sup>[3]</sup>、耙绞联合施工应用<sup>[4]</sup>等。

某项目以耙吸挖泥船艙吹工艺为基础, 在

有可利用沙源地的背景下, 以钢圆筒围堰灌填砂、砂袋充灌两项施工内容为基础, 利用分流平台实现耙吸挖泥船灌填钢圆筒围堰和艙吹装驳的工艺, 以解决该项目外购砂源不足、外购砂成本大、吹砂船效率低、工程进度滞后等问题。本文通过对耙吸挖泥船艙吹钢圆筒及装驳工艺创新应用的分析, 以期耙吸挖泥船艙吹工艺的的运用提供新思路, 为后续类似工程提供示范先例。

收稿日期: 2024-02-23

作者简介: 逯新星(1991—), 男, 工程师, 从事港口与航道建设等相关工作。

### 1 钢圆筒围堰简介

某项目是典型的陆域形成工程，其独特之处在于整个吹填围堰采用大直径钢圆筒围堰，该技术曾在港珠澳大桥香港口岸人工岛岛隧工程得到成功应用<sup>[5]</sup>，主要通过大型振动锤将钢圆筒和副格振沉打入基础持力层。本项目钢圆筒嵌入持力

层达 45 m，钢圆筒及副格内采用回填砂的形式进行稳固，圆筒外侧通过打设碎石桩、铺设砂被以及回填开山石等进行加固，圆筒内侧陆域成型区采用耙吸船舱吹方式进行回填。钢圆筒采用灌填砂形式进行稳固，平均单筒灌填量约 4 000 m<sup>3</sup>，见图 1。

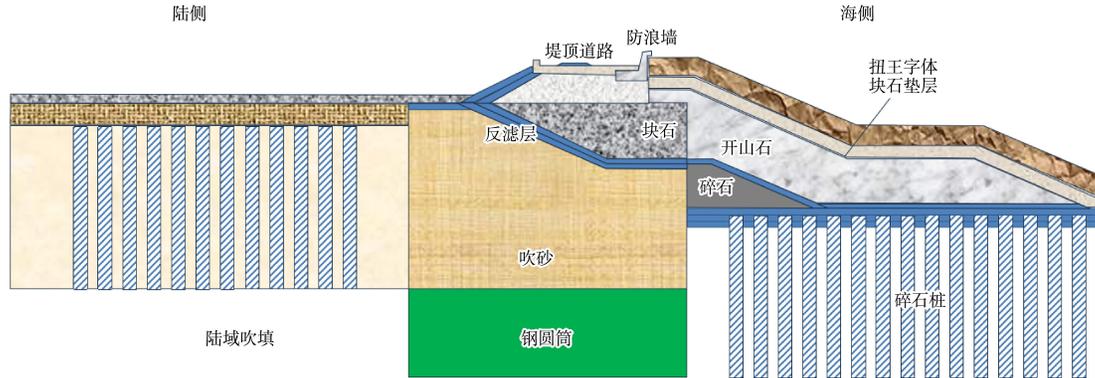


图 1 钢圆筒围堰典型断面

### 2 传统回填钢圆筒工艺

某项目前期回填钢圆筒及副格主要采用 2 种传统工艺，一是利用吹砂船直接吹填钢圆筒；二是利用皮带船抛填干砂的方式<sup>[6]</sup>回填钢圆筒。

由于本工程可利用的砂源地砂层薄，砂质较细，传统吸砂船取砂难、效率低（取砂效率约 2 000 m<sup>3</sup>/d），供砂强度远远不足，且采砂成本大，因此吹砂船直接吹填钢圆筒采用外购砂源。该工艺为水力充填，利用泥浆泵将外购干砂混合海水通过管路输送至钢圆筒内。因外购砂质量较差，导致整体流失较大，经测算，该工艺充填流失率达 30%。

皮带船抛填外购干砂工艺中，皮带船靠近待填钢圆筒，定位完成后，通过船上的滚动皮带机进行送料抛填。该工艺应用时分 2 种方式，首先是常规皮带输送干砂（图 2），由于砂源颗粒较细，输送过程中时常发生皮带船舱底卸料口板结堵塞的情况，严重影响施工效率。后续对平板驳船进行改装，在船上安装大料斗和皮带机，并配备挖机，由挖机负责将砂料卸至皮带机上运送至钢圆筒内，见图 3。皮带船回填钢圆筒为机械式抛填，虽无砂量损失，但施工效率低，单艘皮带船载砂

量约 1 500 m<sup>3</sup>，施工时抛舢锚，受潮水影响每天仅 2 个落潮流能够施工，皮带船运距约 50 km，一艘皮带船每天至多施工 2 个船次，仅 3 000 m<sup>3</sup>，填满 1 个钢圆筒需 3 船砂，耗时 1.5 d，施工效率低、成本高。



图 2 传统皮带船抛填钢圆筒



图 3 平板驳船改装后抛填钢圆筒

### 3 耙吸船回填钢圆筒工艺创新

#### 3.1 工艺创新可行性分析

耙吸挖泥船舱吹钢圆筒工艺的关键在于克服回填钢圆筒的成本和效率问题，实现经济可行性和技术可行性双层突破。

1) 经济可行性。项目存在可利用的砂源地，且砂质情况满足回填钢圆筒的要求，运距也仅 11 km，若采用耙吸船进行“挖、运、吹”，相较于外购砂的成本将大大降低，因此该方案在经济上是可行的。

2) 技术可行性。耙吸挖泥船舱吹和吹砂船吹填的性质是一致的，都是输送水砂混合物，其区别在于耙吸挖泥船舱吹流量大、流速快，搭配的舱吹管线较吹砂船大许多。以该项目其中 1 艘 4 500 m<sup>3</sup> 耙吸挖泥船为例，其舱吹流量高达 10 800 m<sup>3</sup>/h，流速约 5 m/s，舱吹管径 850 mm，而钢圆筒容量仅 4 000 m<sup>3</sup>，舱吹流量过大，钢圆筒被快速填满，不利于泥沙沉淀，必须结合实际工况，制定分流方案。因此，该工艺技术上是可行的，难点则在于制定合适的耙吸挖泥船舱吹分流方案。

#### 3.2 舱吹分流方案

##### 3.2.1 分流流速和支管数量的关系

可利用的分流管外径 450 mm、内径 414 mm，耙吸挖泥船舱吹管路内径 850 mm。根据流量守恒的原理，分流流速和支管个数的关系见式 (1)：

$$n = \frac{\pi(d_1/2)^2 v_1}{\pi(d_2/2)^2 v_2} \quad (1)$$

式中： $n$  为分流支管数量； $d_1$  为舱吹主管内径，取 850 mm； $d_2$  为分流支管内径，取 414 mm； $v_1$  为舱吹主管水流流速，取 5 m/s； $v_2$  为分流支管出流流速，m/s。

由式(1)可以得出，分流流速和支管数量存在负相关性，见表 1。

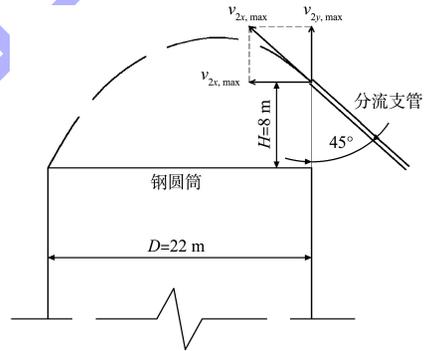
表 1 分流流速和支管数量的关系

$n$	1	2	3	4	5
$v_2/(m \cdot s^{-1})$	21.08	10.54	7.03	5.26	4.22

要确定 2 个变量数据，可按照最不利结果考虑。钢圆筒吹填存在 2 个最不利结果，一种是泥浆流速过快冲出钢圆筒，造成大量损失；另一种是流速过慢导致砂浆沉积，造成管路堵塞。

1)  $v_{2,max}$  确定。根据多年潮汐观测资料<sup>[7]</sup>，最高潮位 5.82 m，最低潮位 -0.21 m。在设计分流支管架设方案时，至少要考虑 6 m 的潮差影响，实际应用时再考虑 2 m 的安全距离，因此架设的分流支管距离钢圆筒边缘筒壁在最高潮位时垂直距离需保证 8 m；同时以节约分流支管耗材为原则，按 45° 向上倾角吹填可达到距离最远考虑。

钢圆筒充填最不利情况即在最高潮位时，经分流支管的挑射水流冲出钢圆筒外，造成大量损失，见图 4。



注： $v_{2,max}$  为分流管最大临界出流速度； $v_{2x,max}$ 、 $v_{2y,max}$  为分流管最大临界出流速度在水平、垂直方向的分量， $H$  为保证分流支管不触碰钢圆筒的垂直安全距离，取 8 m； $D$  为钢圆筒直径，取 22 m。

图 4 最不利吹填钢圆筒临界状态

在忽略空气助力等因素情况下：

$$\frac{\sqrt{2}}{2} v_{2,max} = v_{2x,max} = v_{2y,max} \quad (2)$$

$$H = \frac{1}{2} g t^2 - v_{2y,max} t \quad (3)$$

$$D = v_{2x,max} t \quad (4)$$

式中： $g$  为重力加速度，取 9.8 m/s<sup>2</sup>； $t$  为发生钢圆筒充填最不利情况的临界时间，s。根据式(2)~(4)可计算出  $v_{2,max} = 12.57$  m/s。

2)  $v_{2,min}$  确定。要准确地确定最小吹填流速是极其复杂的，历史上关于泥沙起动流速的研究很多<sup>[8]</sup>，均为半理论半经验公式，且  $v_{2,min}$  不仅取决于泥沙启动流速(由于输送的泥浆水中砂颗粒已经处于悬浮状态)，更需比较不同阶段的水流挟砂力的变化。若吹填泥浆水在主管中的水流挟砂力高于分流后分流支管合计的水流挟砂力，则说明在输送过程中发生了泥沙沉积现象，若不能保持平衡则随着时间推移容易导致堵管。水流挟砂力的计算也存在许多变量，从而出现了许多半经验半理论公式。虽然无法确定公式在本项目的适用性，但从中可以看出，水流挟砂力与流速的3次方呈正比，与水力半径呈反比<sup>[9]</sup>。通常情况下，若水力半径变化不大，只要分流支管的流速不小于主管的流速，则不会发生水流挟砂力变小的情况。因此，本工程确定的  $v_{2,min}$  等于船吹主管的水流流速，即 5 m/s。

根据上述分析，结合表 1 内容，可以得出分流支管数量可取 2、3 或 4 根；再考虑流速越小、扰动越小，一次可吹填数量越多，覆盖钢圆筒的数量越大，吹填效率越高，吹填流失越小，设计 4 根分流支管最为合理，其对应的分流流速为 5.26 m/s。

### 3.2.2 分流设备改造

如图 5 所示，耙吸挖泥船船吹钢圆筒设计思路为耙吸挖泥船通过内径 850 mm 浮管接分流器，分流器再一分四(现场为一分六的分流器，封堵中间 2 个，实现一分四)，变径成 4 根内径 416 mm 的分流支管，再由支管同时吹填 4 个钢圆筒，见图 6。



图 5 分流器装置

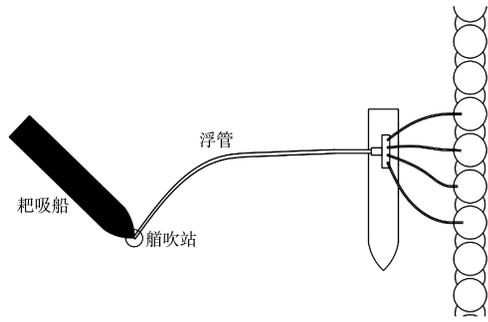


图 6 耙吸挖泥船船吹钢圆筒

钢圆筒直径 22 m，间距 2 m，4 根分流支管架设的最大间距需 72 m。现场选用 105 m 长的平板驳船进行改造，中间泥舱长 75 m，恰好满足架设分流支管的空间。

### 3.3 船吹钢圆筒效果

如图 7 所示，耙吸挖泥船船吹钢圆筒在本项目得到成功应用，是耙吸挖泥船工艺技术的新突破。



图 7 耙吸挖泥船船吹钢圆筒施工

1) 功效分析。本工程耙吸挖泥船船吹钢圆筒可实现一次同时吹填 4 个，整个耙吸挖泥船“挖、运、吹”的运转周期约 6 h，正常天气情况下可实现单日吹填 4 船/艘。实际吹填钢圆筒时存在平台船移船及抛锚等必要的停滞时间，平均日均船次为 3 船左右。4 500 m<sup>3</sup> 的耙吸挖泥船单次装载量约 3 000 m<sup>3</sup>，单日可实现 9 000 m<sup>3</sup> 灌填量。考虑部分流失，可实现单船灌填 2 个钢圆筒，现场 2 艘耙吸船一天即可完成 4 个钢圆筒的灌填，较前期效率提高了 6 倍。

2) 流失率分析。正常情况下，耙吸挖泥船船吹 4 个钢圆筒的流失率在 12% 左右，对比吹砂船 30% 的流失率，提升效果明显。

3) 经济效益分析。对钢圆筒回填砂的成本进行统计、分析、对比, 得出吹填钢圆筒的成本单价, 见表 2。

表 2 综合单方成本

工艺	砂源	成本单价/(元·m <sup>-3</sup> )
吸砂船+皮带船	机制砂	190
	外购砂	116
耙吸船分流	指定砂源地	38

综上所述, 耙吸挖泥船船吹钢圆筒在提升效率和节约成本方面均比传统的吹砂船和皮带船要好。

#### 4 耙吸船装驳工艺

耙吸船船吹装驳工艺在疏浚行业应用很少, 在不同工程上的应用各有差异<sup>[10]</sup>。本项目的耙吸船船吹装驳工艺是在船吹钢圆筒工艺的基础上演变而来, 用驳船替代钢圆筒, 并对分流器进行改装, 可实现双侧分流。通过浮管连接平板驳上固定的分流器, 将主管分流至双侧高密管, 每侧各 3 根分流支管, 分流闸阀可控制实现单侧或双侧装驳, 见图 8。驳船装满后运至现场, 供给吹砂船充灌砂袋。



图 8 耙吸挖泥船装驳

为了实现耙吸船双侧装驳, 避免船吹时与浮管锚位、装驳平台船锚位之间存在干扰, 需结合施工现场水流情况, 根据潮流规律, 装驳平台须顺涨、落潮流方向布设, 船首尾均采用八字锚, 浮管弯曲 90°, 使得耙吸船有足够的回转半径, 确保涨落潮均能实现装驳, 见图 9。

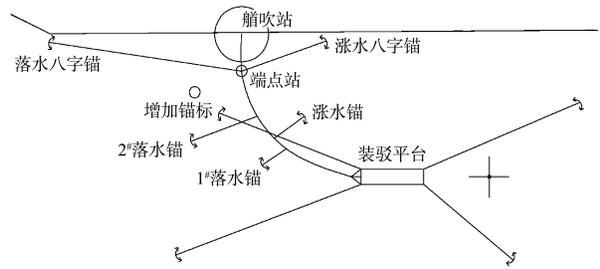


图 9 耙吸挖泥船装驳锚位布置

#### 4.1 装驳效率分析

装驳砂质主要为细粉砂、砂混淤泥。为使耙吸船装驳效率最优化, 特对单侧装驳、双侧装驳进行分析。

1) 改装后的平台船单侧装驳共有 5 船, 其单侧耙吸装驳流失率分别为 60.8%、14.3%、35.6%、16.3%和 7.6%。

根据分析, 改装后的平台船单侧装驳时, 除去装驳流失率的最大值 60.8%, 最小值 7.6%, 得出耙吸装驳平均流失率为 22.1%。

2) 改装后的平台船双侧装驳共统计 29 船, 其双侧耙吸装驳流失率见表 3。

表 3 双侧装驳流失率

装驳船数/船	流失率/%	装驳船数/船	流失率/%
2	6.4	3	18.8
3	36.4	3	17.9
3	15.7	2	5.6
2	13.8	4	22.4
3	22.8	3	23.5
1	5.5		

根据分析, 改装后的平台船双侧装驳时, 除去装驳流失率的最大值 36.4%, 最小值 5.5%, 得出耙吸装驳平均流失率为 16.3%。

综上所述, 改装后的平台船单侧装驳时的平均流失率为 22.1%; 双侧装驳时的流失率为 16.3%。由此可见, 双侧装驳流失率大大降低, 由原有的 22.1%降至 16.3%, 主要原因是双侧装驳情况下驳船的容积量较大, 同时双侧分流后水流的冲击力减弱, 舱内泥沙扰动降低, 提高了耙吸船装驳的工作效率, 装驳流失严重现象得以改善。

## 4.2 降低装驳流失率的措施

1) 保证耙吸船装驳时进行双侧装驳, 尽量安排2条船舶装驳。

2) 双侧装驳时合理安排配置船舶舱容, 2条船舶舱容尽可能相近。

3) 若船舶舱容无法满足第2条措施, 如1大1小2条船舶:“俊辰7”(3 000 m<sup>3</sup>)、“嘉勃6”(5 600 m<sup>3</sup>), 此时舱容较大的“嘉勃6”先单独进行装驳工作, 待装驳1船结束后, 再与“俊辰7”共同装驳2船。

4) 耙吸船在进行耙吸装驳时, 及时控制管线水流流速, 防止流速过大导致砂量流失增加。

5) 耙吸挖泥船规划好取砂位置及路线, 尽可能降低取砂含泥量, 保证耙吸挖泥船装驳砂的质量。

6) 现场调度时刻关注潮水情况, 精准确定可装驳时间, 及时通知运砂船停靠装驳平台, 减少等待装驳时间, 如大潮汛尽量安排在涨潮时段进行装驳, 提高装驳成功率, 保障装驳安全。

7) 每日对过驳平台上的分流器、管线等相关装驳设备进行安全检查, 及时排查隐患, 如遇设备损坏分流器阀门关闭不严、管线泄漏等情况, 立即上报并采取相关措施进行设备修理, 减少砂的流失。

## 5 结论

1) 耙吸挖泥船舱吹钢圆筒工艺在某工程的应用效果良好, 相比传统吹砂船、皮带船灌填钢圆筒工艺, 耙吸船舱吹方式回填钢圆筒不仅解决了

砂源问题, 且施工效率提升6倍, 较外购砂成本节约3/4。

2) 耙吸挖泥船装驳工艺的应用解决了袋装砂砂源问题, 节约了外购成本; 采用双侧装驳较单侧装驳, 流失率降低5.8%。

## 参考文献:

- [1] 程志东. 浅谈耙吸挖泥船施工工艺[J]. 中国水运(下半月), 2012, 12(7): 142-143.
- [2] 杨巍, 万华林. 皮带船联合供砂耙吸挖泥船船吹施工工艺[J]. 中国港湾建设, 2016, 36(11): 61-63, 76.
- [3] 韩政, 王丽华. 大型耙吸船与自航泥驳联合施工的工效分析[J]. 水运工程, 2017(12): 232-235.
- [4] 孙雪梦, 沈伟平. 耙绞联合施工能力匹配计算分析[J]. 水运工程, 2012(3): 149-153.
- [5] 董志良, 朱幸科, 刘嘉. 新型围堰施工技术在围海造陆工程中的应用[C]//中国土木工程学会港口工程分会. 第八届港口工程技术交流大会暨第九届工程排水与加固技术研讨会论文集. 北京: 中国水利水电出版社, 2014: 229-238.
- [6] 谢凤一. 皮带吹砂船在沿海吹填造地工程中的应用[J]. 中国水运(下半月), 2013, 13(4): 240-241, 288.
- [7] 中交第三航务工程勘察设计院有限公司. M项目施工招标图设计说明[R]. 上海: 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 2022.
- [8] 张红武. 泥沙起动流速的统一公式[J]. 水利学报, 2012, 43(12): 1387-1396.
- [9] 侯琳, 张红武, 赵君驰, 等. 水流挟沙力公式的理论剖析与检验[J]. 水利学报, 2023, 54(5): 563-574, 586.
- [10] 刘昊, 蓝洋, 齐仲凯, 等. 1.1万m<sup>3</sup>耙吸挖泥船舱吹装驳施工技术[J]. 水运工程, 2019(10): 204-208.

(本文编辑 王传瑜)

## 著作权授权声明

本刊已许可《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司、北京万方数据股份有限公司、重庆维普资讯有限公司、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含上述公司著作权使用费, 所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。

《水运工程》编辑部