一种先铺法沉管隧道碎石基床的精准清淤机构

马玉文[1]，刘峰[2]
（1. 中交一航局第一工程有限公司；2. 天津港航安装工程有限公司）

摘　要：为解决先铺法沉管隧道碎石基床目前无法达到厘米级精准清淤的问题，提出一种高精度精准清淤机构，采用先刮后绞再吸的方法，将双向刮板、绞龙、潜水渣浆泵整合成一体，将碎石基床表面淤泥清除控制残余厚度在厘米级厚度以内，在实际中使用取得了较好的效果，沉管隧道碎石基床可以达到厘米级精准清淤，为大区域、大水深内河沉管隧道碎石基床精准清淤提供一种新思路。

关键词：先铺法；沉管；精准清淤；碎石基床；深水

0　引言

随着全球城市化进程的加速和交通运输需求的日益增长，航道的基础设施建设愈发受到重视。其中，沉管隧道作为水下过河、过江的重要工程结构，因施工速度快、造价较低、对航运影响小等优势，在航道中得到广泛应用。在沉管隧道的施工过程中，基床稳定性是确保隧道结构安全和长期使用性能的关键因素。通常在调平层之上铺设碎石垫层基础，以确保沉管底板受力均匀，避免沉管不均匀沉降，而隧道基床开挖、块石抛填、碎石整平等过程中均会受到回淤的影响，尤其是近岸水域的含沙量通常较高，基槽开挖导致河道地形改变，基槽内容易产生回淤。在水流速度、含沙量变化、水体扰动等多因素作用下，基床回淤量会加大，甚至造成淤泥聚集[1]。淤泥如果在沉管沉放与对接前厚度超标而未及时清理，将会直接影响沉管的精准沉放与对接，影响隧道的密封稳定性以及后期的沉降稳定性等。因此，在基床开挖块石抛填整平后沉管安装前需根据回淤情况进行相应的清淤工作。

1　工程概况

佛山市顺德区伦桂路工程（横一路—横五路段施工）以双向八车道沉管隧道下穿潭洲水道与佛陈公路，终点与横五路衔接，是该地区建设规模最大的单体项目，基槽开挖宽度受其影响，开挖量大，且受当地水流影响，沉管沉放前回淤量大，因此必须进行清淤。

伦桂路工程内河沉管隧道全长 2.23 km，其中内河混凝土沉管隧道长 316 m，由 1 节短管节和 3 节长管节组成。在沉管浮运安装前，对其沉放的水下基槽进行开挖，使用浮式抛石整平船整平，即在调平层之上铺设碎石垫层基础。碎石基床断面见图 1，图 1 中 A 大样放大图见图 2，双层碎石基床由 0.7 m 块石调平层和 1.0 m 碎石整平垫层组成，并设有 V 形槽，减小开挖误差影响，消纳部分管底沉积淤泥，以提高铺设精度。项目所在潭洲水道径流量大，尤其雨季期间径流剧增，致使基床淤泥增长率高、淤泥堆积特性明显，碎石垫层与沉管间存在厚淤泥且沉放对接过程中未能排出，会导致沉管难以下沉至设计高程，无法实现精准对接施工。淤泥清除标准见表 1。为了不影响沉管下沉，需要在沉管铺设前对基床淤泥进行厘米级的清理，将淤泥厚度控制在 4 cm 以内，同时清淤过程不得扰动石垄，不得将碎石移位。

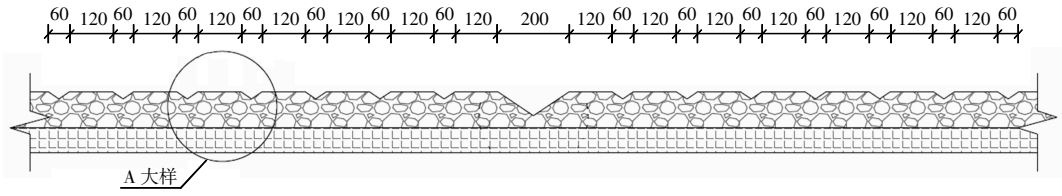


图 1　碎石基床断面示意图（cm）

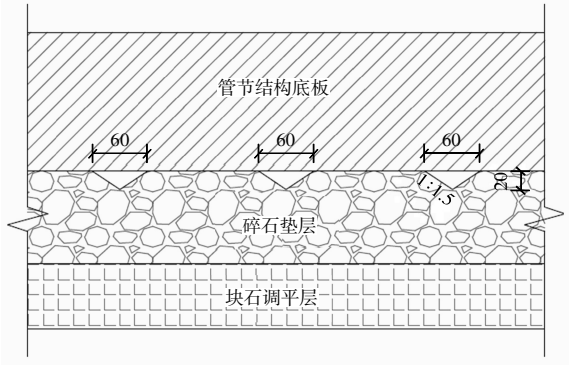


图 2　碎石基床断面局部放大图(A 大样)(cm)

表 1　淤泥清除标准

检测时机	淤泥清除标准
基槽精挖后块石填抛前	密度>1.26 g/cm³ 的回淤沉积物厚>20 cm
块石振密后碎石整平前	密度>1.26 g/cm³ 的回淤沉积物厚>10 cm；或者密度>1.15 g/cm³ 的回淤沉积物厚>30 cm
碎石整平后管节沉放前	多波束量测回淤厚度>15 cm 或密度>1.26 g/cm³ 的回淤沉积物厚>4 cm；或者密度>1.15 g/cm³ 的回淤沉积物厚>8 cm
注：通常在基槽精挖后块石填抛前、块石振密后碎石整平前、碎石整平后管节沉放前 3 个环节都会存在回淤现象，碎石整平后管节沉放前的淤泥厚度则会直接影响到沉管沉放效果。	

由于深水大面积作业的清淤工作极不方便，以港珠澳大桥为例，沉管隧道工程采用了耙吸船工艺进行初步清淤，但是施工速度慢，频繁插拔桩腿，对基槽边坡会有较大影响[2]。市面上的清淤船、水下清淤机器人、带绞刀的泥浆泵等设备或者无法达到厘米级的清淤精度，或者无法固定，或者会对碎石垄造成扰动，均无法满足要求，如果采用挖泥船把已经铺设的石头挖除，再重新铺设，则费钱费时费力，并且要在再次回淤厚度未超过控制厚度之前完成沉管铺设，否则前功尽弃，为此需要设计一种设备，在不破坏已铺设碎石垄的前提下，进行快速精准清淤处理，确保沉管前淤泥厚度满足设计要求。

2　结构设计

为了确保清淤的同时不扰动碎石垄表面，以中交天津港湾工程研究院有限公司的专利“一种模拟碎石基床表面清淤的试验方法”[3]为原型，借鉴专利里清淤头模型“先刮后绞再吸”的思路，对绞龙的动力、绞龙的样式进行了改进，增加了刮板的推进装置，并为了与设备连接，增加了龙门架等结构，因此构建了一种清淤工作机构的模型。清淤工作机构覆盖 2 垄 1 沟，往返均可进行清淤作业，刮板将石垄表面的淤泥层刮散、汇集，绞龙机构在驱动装置作用下正向旋转，刮切叶片在刮削淤泥的同时，使淤泥与水混合形成流动性较强的泥水混合物，同时刮切叶片转动产生驱动泥水混合物向螺旋输运机构中轴线运动的水流力，配合左、右螺旋叶片正向旋转使泥水混合物向中间输运，通过渣浆泵作用排出，实现清淤。

清淤工作机构的基本构造如图 3 所示，清淤工作机构主要包含龙门架、圆筒体、螺旋输送机构、外刮板、潜水渣浆泵等。

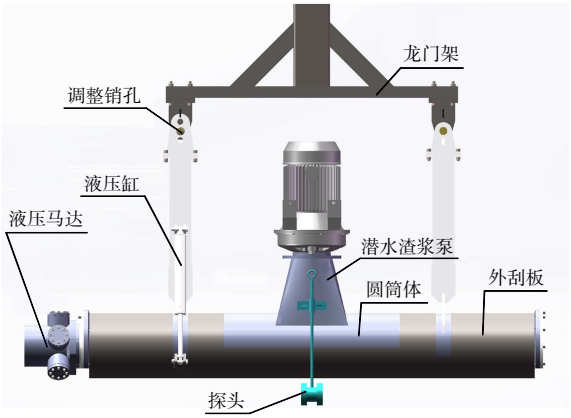


图 3　清淤工作机构基本构造

圆筒体为下方开口的优弧板，长度覆盖 2 垄 1 沟，与龙门架固接。圆筒体作为载体，内部安装螺旋输送机构，外部安装外刮板，中部开口连接渣浆泵，将大部分泥水阻挡控制在圆筒体范围内。螺旋输送机构由左右对称的绞龙和圆弧形式的刮切叶片交错组合而成，两端与圆筒体端部采用轴孔方式连接。螺旋输送机构由液压马达驱动旋转带动，将刮板刮除分散的淤泥混合水送至圆筒体中部，与液压马达连接部分采用非标设计的密封装置，确保杂质不进入液压马达。外刮板为弧角稍小于圆筒体弧角的优弧板，安装在圆筒体外部，用于刮起淤泥。刮板方向调整由 2 套液压缸驱动，根据清淤运行方向，液压缸伸缩带动外刮板按顺时针或者逆时针转动，调整外刮板低点至运行方向后下方。外刮板转动到位后，底部即为清淤工作机构的最低位置，装置在水平运动时，外刮板底部将淤泥表层刮走并粉碎。理论上，外刮板最低点与圆筒体最低点的高差即为受控刮除清淤厚度。潜水渣浆泵通过天圆地方结构安装在

圆筒体中部开口处，将螺旋输送机构送过来的泥水吸走，经出水管排出。

3　参数计算

从物流运输的角度，物料的基本路径是：刮板将泥沙从石垄表面脱离，与河水混合，在螺旋输送机构作用下到达圆筒体中部，再经由泥水渣浆泵输出。为此建立一种逻辑关系：在相同时间里，刮板刮除的沙量加上水量的合量应与螺旋输送机构输送的含沙水量匹配，同时单位时间里螺旋输送机构输送的含沙水量与渣浆泵的排水能力匹配。

3.1　刮板刮除的沙量计算

1）待处理工作量计算

待处理工作量即单次刮除纯泥沙的体积 V，取单次清淤厚度 h 与石垄宽度 B、长度 L 的乘积进行计算。

2）处理效率计算

不考虑船体挪移定位时间及工作搭接时间，清淤速度为 v，清淤头单次处理宽度为 b，每小时纯泥沙的处理量 $s=h\times v\times b$，清理完一层需要的理论时间为 $V/(h\times v\times b)$。

纯泥沙每小时处理量为 w，泥水混合物的体积比例 1:1，泥水混合物的对应每小时处理量为 $2w$，再考虑到一定的使用系数，进行潜水渣浆泵的选型。

3.2　螺旋输送机构的输送量计算

螺旋输送机构输送量 Q 是绞龙的输送量，可以通过计算绞龙转速、尺寸和填充系数等参数来获取，计算公式为[1]：

$$Q=47\beta\times\varphi\times\rho\times D^2\times S\times n$$

式中：β 为倾斜系数；φ 为物料填充系数；ρ 为物料容量重，t/m^3；D 为螺旋叶直径，m；S 为螺距，m；n 为转速，r/min。

螺旋输送机构输送量的计算结果应与潜水渣浆泵的选型参数匹配。

4　物理模型试验

为了验证清淤工作机构的使用效果，组织了现场模拟试验，如图 4 所示。在池底铺设 2 道石垄，由碎石组成，按照现场碎石基床平面尺寸进行布置，将细砂、泥土按设定比例充分搅拌混合，在石垄上方按不同分段不同厚度铺设，再从外侧缓慢注入水至所需水位。

试验主要关注泥浆参数和设备运行参数：泥浆参数包括泥层厚度 h、淤泥种类等；运行参数包括清淤速度 v、转速 n、输送量 Q 等。

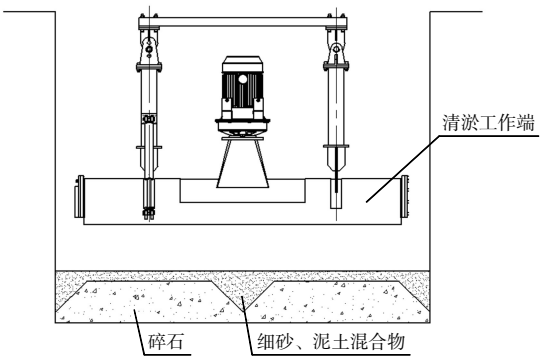


图 4　现场模拟试验界面

除此之外，将清淤头绞龙最下方调至泥面以下 1 cm、2 cm、3 cm，验证清淤设备的最大清淤性能。左右两侧分别采用刮板到位和刮板抬起同步测试，对比刮板对清淤效果的影响。

根据需要，试验记录水泵的流量变化、清淤结束泥层剩余厚度：水泵的流量变化使用电磁流量计进行采集；泥层剩余厚度通过人工方式测量，每间距 1.5 m 作为一个测量断面，每个测量断面布置 3 个测点，用钢直尺测量泥层厚度，记录数据，分析每个断面的平均泥层剩余厚度。为了确认与淤泥直接接触的刮板的作用，将清淤工作机构分成左右 2 个部分，一侧将刮板下放到最低设定位置，使刮板下方与淤泥直接接触；另一侧将刮板抬起，即刮板不作用，由绞龙底部与淤泥直接接触。

根据本次试验方案的目的，制定试验步骤如图 5 所示。

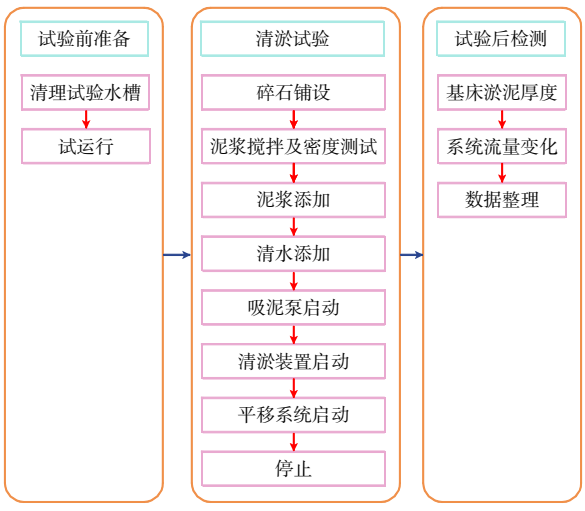


图 5　试验步骤

将碎石装至试验槽内，人工整平，中间垄沟由 V 形槽确定，两边垄沟由人工放坡。按比例将细砂、泥土混合，敷设至试验场地，最后注入清水，注入清水过程中注意避免扰动砂石，并设专人看护，进行视频采集，确保加水不溢出。

按照试验内容及参数进行试验，先开启渣浆泵，再启动绞龙，待渣浆泵出口有泥浆排出时，启动行走台车。期间观察渣浆泵流量、出水状况、设备受阻状况等，调整不同行走速度和不同刮板切入深度，做好相应标记。试验结束后，按相反顺序关闭各设备。试验过程中应保证水不漫出水池，且应保证渣浆泵始终处于水中。

试验结束后慢慢将水排出，泥面留出较浅层水，以免排水过程中影响到泥面的自然状态，静置 48 h 后，对比有无刮板作用的影响，再用探针法实测处理后的淤泥厚度。

静置 48 h 后淤泥表面状态如图 6 所示，靠墙侧有刮板作用，另一侧无刮板作用，显然有刮板作用侧的泥面更加平滑，而无刮板作用侧是绞龙通过淤泥层，表面明显不平。因此可以说明，刮板对于清淤表面平整度的控制是至关重要的。



图 6　静置 48 h 后淤泥表面状态

静置 48 h 后实测淤泥厚度值如表 2 所示，在铺设泥沙的时候，按行程区分出 10 cm、20 cm 两种厚度。10 cm 厚度的区域，无刮板侧的淤泥层，实测厚度平均为 10 cm，几乎没有刮除掉；有刮板侧的淤泥层，实测厚度平均为 4.67 cm，平均刮除厚度为 5.33 cm。20 cm 厚度的区域，无刮板侧的淤泥层，实测厚度平均为 9 cm，不同点之间的数据偏差较大，平均刮除厚度为 11 cm；有刮板侧的淤泥层，实测厚度平均为 4.5 cm，不同点之间数据非常均衡，平均刮除厚度为 15.5 cm，达到了预设的清淤效果。

表 2　物理模型静置 48 h 后实测淤泥数据

cm

位置	10 cm 厚度区域								20 cm 厚度区域					
	实测厚度						平均厚度	平均刮除厚度	实测厚度				平均厚度	平均刮除厚度
无刮板侧	11	9	11	9.5	10	9.5	10	0	9.5	9.5	8.5	8.5	9.0	11.0
有刮板侧	5	4	4.5	5	5	4.5	4.67	5.33	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	15.5

5　结语

本文研究的清淤工作机构结构紧凑，使用可靠，为内河沉管隧道碎石基床首次达到厘米级的精准清淤方式，施工风险小，推动了技术创新。该机构为清淤工作端，实际在使用时，需配置平移装置、升降装置、深度监测装置及控制系统等，该设备在伶桂路潭州隧道中得到实际运用，能够有效将水面以下 21 m 的碎石基床表面淤泥刮除并排出，留存的淤泥厚度控制在 4 cm 以内，且处理面均匀平缓，满足设计要求。该装置将为类似大区域、大水深的高精度清淤工程提供可靠技术支撑和经验借鉴，促进我国水运工程建设水平整体提升，对推动内河沉管隧道建设技术进步具有重要意义。

参考文献：

[1] 王聪，李涛，冯先导，等. 内河沉管基床自浮式清淤平台研发及应用[J]. 中国港湾建设，2025，45(9)：24-28.

[2] 张乃受，冯海暴. 沉管碎石基床清淤新方法[J]. 中国港湾建设，2018，38(7)：52-56.

[3] 中交天津港湾工程研究院有限公司. 一种模拟碎石基床表面清淤的试验方法：ZL202411446487.6[P]. 2025-01-10.