

大型干船坞沉箱围堰止水与拆除施工关键技术

王生娴，曲云霄

（中交一航局第三工程有限公司）

摘 要：为解决大型干船坞沉箱围堰止水与拆除过程中的止水效果不佳及拆除困难的技术难题，采用理论分析和现场实践相结合的方法深入研究。在止水技术方面，通过砂浆配合比设计，显著提高了围堰的止水效果。在拆除技术方面，创新性地提出抽砂和挖砂相结合工艺，同时经计算总结了定倾高度安全值，使得沉箱拆除顺利实施。实践结果表明，抽砂法、铺设隔断土工布以及沉箱起浮等施工关键技术不仅提高了施工效率和质量，而且降低了安全风险。为大型干船坞沉箱围堰止水与拆除提供了有效的技术支撑，对于提高沉箱围堰工程施工水平具有重要意义。

关键词：干船坞；沉箱围堰；止水；沉箱拆除

0 引言

随着船舶工业的快速发展，大型干船坞的建设与维护过程中，沉箱围堰的止水与拆除施工技术显得尤为关键。然而，当前这 2 项技术在实际工程施工中仍然存在诸多挑战，比如止水效果不稳定、拆除过程中的安全风险等，这些问题直接影响了施工的质量、效率和安全。虽然目前国内外已有不少关于沉箱围堰止水与拆除技术的研究，但这些研究多侧重于理论探讨或小型工程的应用实践，对于大型干船坞这样复杂且规模庞大的工程，其实用性和适用性仍有待提升。特别是在止水材料的研发、围堰结构的优化设计、拆除工艺的创新等方面，仍然需要深入系统地研究和实践验证。

本研究以大型干船坞沉箱围堰止水与拆除施工关键技术为目的，旨在通过理论分析与现场实践相结合的方式，深入探索沉箱围堰在大型干船

坞中的止水关键技术及安全高效的拆除方法。期望通过本研究，不仅能够解决当前施工中遇到的技术难题，还能为相关领域提供新的技术思路和实践经验，从而推动船舶工业的持续发展，提升工程施工的整体水平。

1 工程概况

1.1 工程规模

大洋厂区 1 号船坞改造工程堵口围堰采用沉箱重力式结构。堵口围堰共计沉箱 6 座，单个沉箱重约 1 800 t。升浆混凝土用碎石基床采用粒径为 8~16 cm，无风化、无针、粒状新鲜硬质岩石料，块石强度不低于 30 MPa，要求抛填后的孔隙率>40%。堵口围堰沉箱在船坞施工完毕后需二次起浮，施工应采取可靠措施确保其完整起浮二次利用。沉箱底部布设土工布进行隔离，土工布应具有一定的强度和抗刺破能力。围堰沉箱施工参数见表 1。

表 1 围堰沉箱参数统计表

沉箱编号	沉箱型号	沉箱尺寸	仓格数量/个	仓格尺寸	内填砂/m ³	升浆孔道数量/个
1	CX-4	20.15 m×12.50 m×13.00 m	15	3.59 m×3.80 m	2 542.5	62
2	CX-2	20.15 m×12.50 m×13.00 m	15	3.59 m×3.80 m	2 542.5	50
3	CX-1	20.15 m×12.50 m×13.00 m	15	3.59 m×3.80 m	2 542.5	45
4	CX-1	20.15 m×12.50 m×13.00 m	15	3.59 m×3.80 m	2 542.5	45
5	CX-3	20.15 m×12.50 m×13.00 m	15	3.59 m×3.80 m	2 542.5	50
6	CX-5	20.05 m×12.50 m×13.00 m	15	3.59 m×3.80 m	2 200.8	62

1.2 工程地质

本次拟建 1 号船坞改造项目中分布基岩主要为板岩，渗透情况参考《大连大洋船舶工程有限公

司修船基地工程地质勘察综合报告》中压水试验成果，经统计拟建场地中风化板岩透水率约 5.93 Lu，经转换相应渗透系数约 6.5×10^{-4} cm/s。本场地基岩

层面起伏较大,上覆土层分布不均匀,上覆土层中第①₁层素填土土质不均,透水性较大;第④层含黏性土碎石土主要由碎石及黏性土组成,碎石成份主要为石英岩、石英砂岩,在场地内分布不均,局部缺失,透水性较大;其下分布⑤₂层强风化板岩及⑤₃层中风化板岩,板岩相对较完整,其岩体中透水性相对较小。综上分析,拟建场区地层渗透性差异大,船坞区开挖施工时,需先行施工坞墙排桩基础及外部围堰,做好止水措施。

1.3 止水围堰结构形式

止水围堰结构形式为沉箱重力式结构,围堰

总长度约为 150.2 m。围堰沉箱基础采用升浆抛石基床的结构,为确保围堰结构稳定,基槽需要深入开挖至强风化岩面。沉箱内部采用中粗砂回填。其底部高程设定为-8.00 m,顶部高程为+2.50 m。沉箱长为 20.15 m、宽为 12.5 m、高为 13.0 m,一共设有 6 座,每座沉箱的自重约为 1 800 t。沉箱之间采用对头相接的方式,空腔内回填水下混凝土从而增强结构稳定性。围堰的上部内外两侧构建有浆砌块石挡墙,挡墙之间的空间采用开山石渣回填。

沉箱围堰典型断面图如图 1 所示。

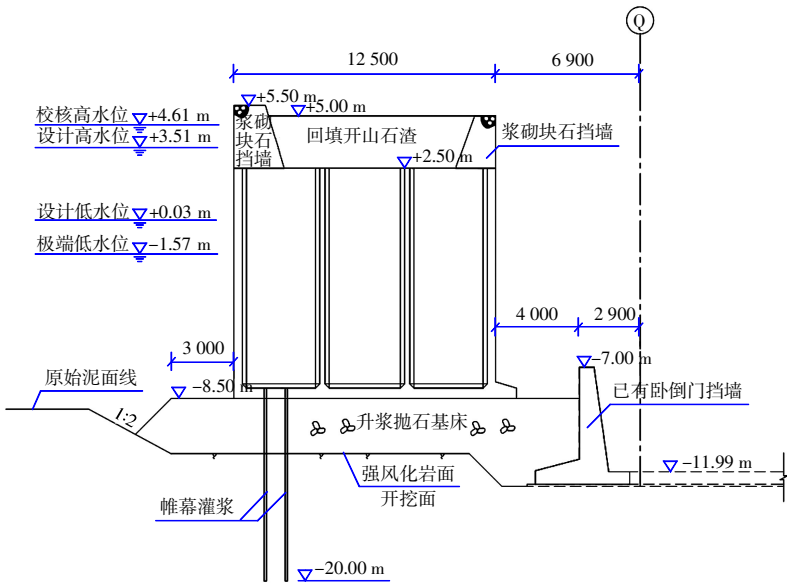


图 1 沉箱围堰典型断面图(mm)

2 施工流程

大型干船坞沉箱围堰止水与拆除关键技术主

要涉及围堰止水和沉箱拆除 2 部分,施工流程如图 2 所示。

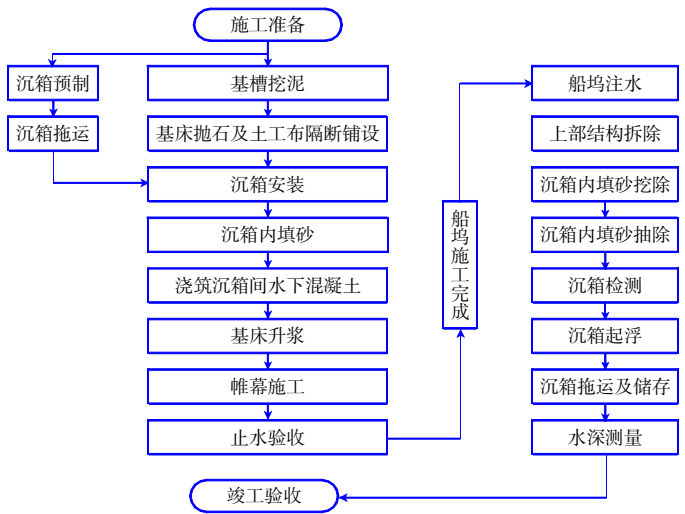


图 2 施工流程图

3 围堰止水施工

3.1 基槽挖泥

基槽较深处需分层挖泥, 以免基槽边坡坍塌。本工程采用 8 m^3 抓斗式挖泥船进行挖泥, 根据地勘资料, 该区平均挖泥深度为 3.5 m , 施工过程中利用全站仪和水砣测出挖泥船所挖点位的泥面标高, 然后利用深度仪控制挖泥船下挖深度。基床抛石前, 需要对回淤情况进行密切观测, 若发现回淤厚度大于 20 cm , 则需要及时采用气力泵进行吸泥清淤, 确保抛石基床升浆质量。

3.2 基床抛石

升浆抛石基床选用粒径为 $8\sim 16\text{ cm}$ 二片石, 在石料场人工配合机械筛分石料, 并用清水冲洗干净, 运输至上料码头, 由抛石船运至施工现场。抛石船驻位后由抛石人员测量水深并根据设计图纸的基床高程及潮位情况计算出基床需要进行抛填的高度, 抛石人员据此指挥抛填。抛填过程中

及时测量水深并根据潮位情况进行校核。抛石接近顶面设计高程时, 抛石人员用测砣 1 m 间隔进行测量抛石找平。由于石料粒径较小, 如遇暗流较大处可用钢筋制作简易抛石下料通道进行精确抛石。

3.3 土工布隔断铺设

为保证基床升浆质量, 抛石施工段间以及抛石基础采用土工布进行隔断和包裹。隔断前应对抛石坡肩面进行整平, 以保证土工布不被砸破。隔断位置根据升浆施工段划分共设置 2 个, 分别位于 2 号沉箱和 3 号沉箱接缝处, 4 号沉箱和 5 号沉箱接缝处, 见图 3。抛石接近隔断处时, 应加强对坡肩线的控制, 确保坡肩高度及顺直。如隔断处坡肩高差过大或坡肩线不顺直, 应采用钢筋制作下溜通道进行局部补抛, 确保坡肩质量。坡面处应注意平整度, 避免坡面高差过大、不平整导致土工布被压破。

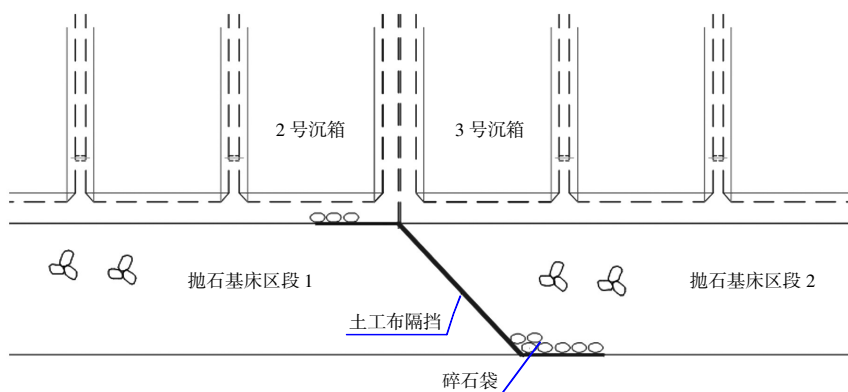


图 3 土工布隔断断面图

利用钢管制作卷轴由潜水员自上而下推轴进行土工布铺设, 铺设方向为顺基床方向。铺设时, 每边与边界搭接或外伸不小于 1 m 。每铺设 1 卷土工布, 坡脚及坡肩采用袋装碎石压载固定。

3.4 基床升浆

升浆施工过程中, 施工段的推进顺序至关重要。本项目按照升浆单元划分, 以沉箱的宽度方向为轴线, 从一端开始逐步向另一端进行。每个升浆单元的施工, 优先处理临海侧的升浆孔, 待外排孔的压浆即将完成时, 再对内排孔进行施工。整个过程中, 每个泵对应一个孔, 确保施工效率。

为确保升浆质量, 每个灌浆管的压力需保持均匀。升浆过程中, 为保持水下砂浆面的均衡上升, 应优先灌注基床底面较低的部位。升浆管在

水下砂浆中的埋入深度不得低于 1.0 m 。随着砂浆液面的上升, 需适时提升升浆管高度, 并逐件拆卸升浆管。每次提升的高度应控制在 1.0 m 以内, 以保证升浆管底部的埋入深度^[1]。

升浆过程中应尽量避免中断, 如遇升浆管堵塞, 应使用小管径钢管进行疏通, 禁止采用通水方法, 以免影响升浆质量和造成二次堵孔。同时, 需专人观测砂浆浆面的标高, 通过比重仪进行监测。

当砂浆灌入量达到抛石体积的 45% (理论计算方量), 且相邻观测孔内的砂浆平均浆面高于沉箱底面 20 mm 时, 即可结束升浆作业。

3.5 基床升浆配合比

本文对砂浆配合比的设计进行了深入研究, 以适应止水围堰的特殊作用和用途。在设计过程

中,全面考虑了砂浆的流动度、膨胀率、泌水率、凝结时间和抗压强度等关键指标,并根据工程实际情况对配合比进行调整。为确保满足本工程的设计要求,针对各项技术参数进行对比试验,从而确定砂浆的配合比。

1) 机制砂

砂浆的细骨料选用机制砂。鉴于机制砂在全国首次应用于升浆施工领域,对机制砂进行专项试验。经过严格的试验分析,确定机制砂的细度模数为2.1,石粉含量≤10%。这些参数的确定,为升浆施工中的砂浆使用提供了重要依据。

2) 流动度

在砂浆中掺入高效减水剂后,其流动度显著提升。经过试验验证,当砂浆的流动度为14~19 s时,其性能表现较为优越。若流动度低于13 s,砂浆可能会出现沉淀和离析的现象,不利于施工过程的稳定与砂浆的质量。当流动度超过23 s时,升浆管路极易发生堵塞,不仅给施工带来诸多不便,还可能对施工质量产生负面影响。因此,控制砂浆的流动度在合理范围内是确保施工顺利进行和工程质量的关键。砂浆的流动度和泌水率对比如表2所示。

表2 砂浆的流动度和泌水率对比

序号	配合比(胶凝材料:机制砂:水)	流动度/s	泌水率/%
1	1:2.2:0.59	21	1.9
2	1:2.2:0.58	24	1.6
3	1:2.2:0.57	27	1.5
4	1:2.4:0.62	15	2.1
5	1:2.4:0.61	17	2.0
6	1:2.4:0.60	19	1.8

由表2可知,后3组配合比配置的砂浆满足施工流动度要求。

3) 膨胀率

水下膨胀率的设计要求为0.5%~1%,而本工程止水围堰基床的平均水深为12.0 m。遵循波义尔定律,配置的砂浆膨胀率应控制在0.9%~1.8%。当应用于水下环境时,其膨胀率会受到水深的影响,水下实际膨胀率 E_p 可以通过以下公式计算:

$$E_p = E_o / (1 + h/10)$$

式中: E_p 为水下实际膨胀率,%; E_o 为计算配置膨胀率,%; h 为平均水深,m。

当 E_o 取1.5%, h 取12时,计算得出 E_p 值为

0.68%,符合设计要求^[2]。

4) 配合比

根据试验,最终确定砂浆配合比为胶凝材料:机制砂:水=1:2.4:0.61。

3.6 帷幕施工

帷幕钻孔采用地质回转钻机金钢石钻头钻进的方法进行施工。孔位为预留孔位,孔位偏差不大于50 mm;为确保止水帷幕幕体的整体性,钻孔孔斜不超过孔深的3%。为达到良好的灌浆效果,在每段钻孔结束后,对钻孔进行冲洗,将岩石裂隙或空隙中所充填的泥质充填物冲出孔外,或将其推移到灌浆范围以外。

止水帷幕灌浆分两序进行施工,施工遵循逐渐加密的原则,即先施工Ⅰ序孔,后施工Ⅱ序孔。接触段的段长为沉箱底面至基床底面以上1.0 m,综合土层内长为4.0~5.0 m,中风化岩层内灌浆段长度不大于6.0 m,中风化岩层与综合土层结合部位(接合段)灌浆段长度不大于2.0 m。在设计压力下,当注入率≤1 L/min时,可继续灌注45 min后结束。

4 沉箱拆除施工

4.1 船坞注水

船坞主体结构全面施工完成后,为了确保坞内注水过程的顺利进行,利用CX-5沉箱预留的1号进水孔(直径1.5 m),通过乘潮漫流的方式进行坞内注水。当潮位低于+1.0 m时,从1号进水孔开始逐步注水。随着注水的进行,船坞内部的水位逐渐上升,当坞内外水面高差小于0.5 m时,可以开始堵口围堰沉箱的拆除施工。

4.2 沉箱内填砂挖除

沉箱内填砂挖除总深度为7 m(标高+4.5~-2.5 m)的填砂。调用长臂挖掘机在沉箱的顶部作业,提高沉箱内部的填砂挖除效率。内填砂挖除过程中,各仓格间均匀施工。为确保沉箱结构的稳定性和安全性,严格控制相邻隔舱砂面的高差,确保其不超过2 m。防止因砂面高差过大而导致沉箱结构变形或损坏,挖除填砂的过程采取必要的措施,避免对沉箱本身造成损伤或破坏。

4.3 沉箱内填砂抽除

对于沉箱内剩余的填砂,采用抽砂泵清除。通过抽砂泵将沉箱内的砂子有效抽出,并外排至泥驳中。运输过程中,在泥驳底部铺设土工布,有效防止填砂的泄漏。抽砂过程中,保持沉箱的

满水状态,防止沉箱任意浮起,确保抽砂工作顺利进行。同时,在抽砂泵附近安装射水管,对抽砂泵进口处填砂进行扰动,使其更易于被抽砂泵吸入,从而提高抽砂效率。为确保沉箱浮游稳定性计算的准确性,剩余砂厚度误差控制在 ± 0.2 m,确保沉箱在后续使用中的安全性和稳定性。

4.4 沉箱检测

在围堰沉箱拆除起浮前,对沉箱结构、沉箱渗漏情况以及沉箱拖环进行检测,确保沉箱在起浮和拆除过程中的安全性和稳定性。

1) 沉箱结构检测

对沉箱进行结构完整性检查。通过目视和必要的无损检测手段(如超声波检测),检查沉箱结构是否有裂缝、变形或其他结构损伤,重点检查沉箱仓格壁有无损坏。

2) 沉箱渗漏情况检测

对沉箱内外表面进行全面检查,找出可能存在的渗漏点。重点检查帷幕管道与底板接触部位、沉箱进水口盲板密封情况。通过测量渗漏点的数量和大小,以及渗漏速度,评估渗漏对沉箱起浮和拆除施工的影响。

3) 沉箱拖环完整情况检测

检查拖环与沉箱的连接是否牢固,有无松动或断裂。对拖环本身进行结构完整性检查,确保其无裂纹、变形或其他损伤。根据沉箱的重量和起浮过程中的受力情况,评估拖环的承载能力是否满足要求。

通过全面、细致地检测,可及时发现并处理潜在的安全隐患,确保施工顺利进行。

4.5 沉箱起浮

沉箱起浮前,需通过测量剩余砂的高度和沉箱内压水高度精确计算沉箱重量和浮游稳定性,并据此绘制潮位与起浮受力关系表。为确保沉箱起浮过程的稳定,定倾高度应保持在 0.5 m 以上。本工程沉箱起浮时,经过计算定倾高度为 1.37 m,干舷深度为 4.0 m,吃水深度为 9.0 m。为确保施工抽水及人员撤离时间充足,沉箱在标高+0.5 m 以下应保持稳定,不得随意起浮。

完成沉箱内填砂抽除后,选择+1.5 m 潮位落潮时进行抽水作业,并在+0.5 m 潮位前完成全部抽水工作。抽水起浮前,将沉箱四角通过缆绳连接到相邻沉箱或水中抛锚,防止起浮过程中沉箱跳跃侧倾造成损坏。抽水完成后,观察沉箱的起

浮情况。沉箱预抽水阶段,需对潮位进行预判和分析,确保在 1 个潮位周期内完成所有施工作业^[9]。本项目中,6 座沉箱克服升浆混凝土黏结力起浮后上升平均高度为 0.91 m,沉箱起浮过程中每平方米需克服黏结力为 932.75 kN。

抽水完成后,利用视频监控和现场观察相结合的方式,持续监测沉箱的起浮状态和姿态变化,一旦发现异常立即采取措施。详细记录起浮过程中的各项数据,包括潮位、抽水时间、沉箱姿态变化等,为后续类似工程提供经验和参考。

4.6 沉箱拖运及储存

沉箱起浮后,需立即进行压水调平操作,并仔细检查沉箱是否存在漏水情况。随后进行漂浮试验以确定沉箱是否具备拖带条件。如满足拖带要求,利用拖轮将其安全拖运至指定的沉箱储存场所,抽水方驳将全程跟随,确保施工的安全与顺利。

5 止水监测与预警

5.1 监测内容及监测点布置

围堰形成后选择具有相应资质的第三方机构进行监测,监测内容及监测点布置如下:

1) 监测内容为:围堰渗水量,围堰位移、倾斜和沉降监测。

2) 监测点布置:围堰渗水量观测点位于围堰内总集水坑,采用自动水位报警系统。船坞施工期间沉箱围堰的位移、沉降观测点布设于围堰上部结构和底部侧壁上。每个沉箱设置 4 个观测点,顶部观测点位于标高+5.50 m 处,底部侧壁观测点位于标高-7.2 m 处。

3) 通过人工巡视围堰表面和周边环境,发现异常情况及时处理。重点检查围堰的完整性、是否有裂缝或渗漏现象等。

5.2 观测频率及报警值

对采集到的监测数据进行分析 and 处理,通过对变形趋势和变化速率的分析,预测围堰的变形发展趋势,及时预警可能存在的安全隐患。当监测数据出现异常或超过安全范围时,应立即启动预警机制。同时制定详细的应急预案,包括应急响应流程、人员分工、设备准备等。一旦发生紧急情况,迅速采取措施,确保围堰的安全和稳定。沉箱围堰的观测频率为 2 次/d,渗水量不得超过 200 m³/d,在位移监测方面,设定了严格的报警阈值,沉箱向坞内水平位移不得超过 5 mm/d,累计

水平位移不得超过 30 mm，沉箱沉降值不得超过 5 mm/d，累计沉降值不得超过 50 mm。

5.3 监测成果

围堰形成后，船坞施工期间，对围堰渗水情况和围堰位移、沉降持续监测。围堰单日最大渗水量为 153.8 m³，满足设计要求。围堰沉箱位移、沉降监测数据如表 3 所示。

表 3 围堰沉箱位移、沉降监测数据

监测点编号	单日最大位移	累计位移	单日最大沉降	累计沉降
1 号	3	8	2	19
2 号	2	12	2	22
3 号	3	13	3	32
4 号	2	10	2	18
5 号	2	9	2	16

由表 3 可知，3 号监测点的累计位移和累计沉降最大，主要由于该位置处于围堰中间部位，地质条件较为软弱且受到的水流、波浪外力影响较大。所有监测点的单日最大位移和沉降均为 2 mm 或 3 mm，没有显著差异。这表明在监测期间，各个监测点单日内的位移变化量相对均匀，没有

出现突然的大幅度位移。

在后续工作中，需要密切关注这些监测点的数据变化，以便及时采取必要的措施来确保围堰沉箱的安全稳定。

6 结语

大型干船坞沉箱围堰止水与拆除技术的成功实施，对于保证船坞建造工程的顺利进行至关重要。其涉及的技术要点不仅体现了工程建设的复杂性和挑战性，也展示了现代工程技术的高度发展。通过精确计算、科学设计和严格施工，能够有效控制围堰的止水效果，确保船坞内部施工环境的稳定和安全。本工程通过精心组织和严格管理，确保了沉箱拆除过程的安全和高效。同时，通过拆除废弃物的处理和回收利用，实现了资源的节约和环境的保护，可为类似工程施工提供参考借鉴。

参考文献：

[1] 刘志明,王芳. 水下抛石基床升浆止水施工技术在船坞工程中的应用[J]. 中国水运(下半月),2019,19(5):159-160,210.
[2] 李松涛,王向宇,于鹏程. 机制砂代替河砂在预填骨料水下升浆混凝土中的应用[J]. 港工技术,2019,56(S1):93-96.
[3] 赵春磊. 沉箱围堰拆除施工技术总结[J]. 工程与建设,2020,34(1):147-148.