



# 框套顶压水下施工装置设计与应用

张 勇

(长江三峡通航管理局, 湖北 宜昌 443000)

**摘要:** 圆柱形结构表面设置水下挡水装置, 需解决装置与圆柱结构共同密封挡水和承担装置所受上浮力两大问题。通过现有围护挡水结构的分析, 提出了一种由挡水结构和受力结构两部分组成的框套顶压水下施工装置。挡水结构为底部预留圆孔、顶部敞开的剖分式框套结构, 通过预留圆孔与圆柱结构的紧密接触挡水; 受力结构为布置在桩基顶部的井字形顶压式结构, 承担挡水结构上浮力并传递至相邻的 2 根桩基结构上。结合某高桩码头的浮式系船桩钢套箱安装实践, 进行了装置设计和桩基结构稳定性验算, 明确了施工要点及工序控制要求。本装置可重复使用、经济合理、技术可行, 可为类似工程水下施工提供借鉴。

**关键词:** 水下施工; 围护挡水结构; 框套顶压装置; 剖分结构

中图分类号: U 656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)06-0226-05

## Design and application of underwater construction device subjected to top pressure of casing

ZHANG Yong

(Three Gorges Navigation Authority, Yichang 443000, China)

**Abstract:** If the underwater water retaining device is to be installed on the surface of the cylindrical structure, it is necessary to solve the two major problems of sealing and retaining water together with the cylinder structure and bearing the buoyancy of the device. Based on the analysis of existing water retaining structures, this paper puts forward a kind of underwater construction device subjected to top pressure of casing which is composed of water retaining structures and bearing structures. The water retaining structure is a split casing structure with a circular hole reserved at the bottom and an open top, and the water is retained by the close contact between the reserved circular hole and the cylindrical structure. The bearing structure is a well-shaped top pressure structure arranged on the top of the pile foundation, bearing the buoyancy on the water retaining structure and transmitting it to the two adjacent pile foundation structures. Combined with the installation practice of the floating mooring pile steel casing box of a high-piled wharf, the device design and the stability check calculation of pile foundation structures are carried out in this paper, and the construction key points and process control requirements are clarified. The device is reusable, economical, reasonable, and technically feasible, which provides a reference for the underwater construction of similar projects.

**Keywords:** underwater construction; water retaining structure; device subjected to top pressure of casing; dissection structure

### 1 工程概况

某码头位于长江干流三峡—葛洲坝枢纽之间, 采用直立式高桩梁板结构。码头前沿长 100 m、宽 8 m, 排架间距 7.5 m, 基础采用 2 排  $\phi 1200$  mm 嵌岩灌

注桩(基岩以上部位设有  $\phi 1400$  mm、 $\delta 16$  mm 钢护筒)。码头设计水位 63.0~66.5 m(吴淞高程), 常年最低水位 63.5 m。受三峡—葛洲坝梯级枢纽水库调节的影响, 码头水位日变幅及小时变率较大。

收稿日期: 2022-08-11

作者简介: 张勇 (1965—), 男, 硕士, 正高级工程师, 从事港口及航道工程建设和技术管理工作。

为保障船舶靠泊安全，设计采用浮式系泊方式。码头排架前沿设置 5 套 100 kN 浮式系船柱，其导槽采用钢套箱结构，底高程 59.4 m，见图 1。钢套箱结构顺水流方向长 2.26 m、厚 1.60 m，单件质量 24.75 t，距嵌岩灌注桩中心 1.20 m，通过 2 根  $\phi 700$  mm 的钢联撑与外侧桩基钢护筒焊接，钢套箱竖向设 A300H 橡胶护舷，见图 2。

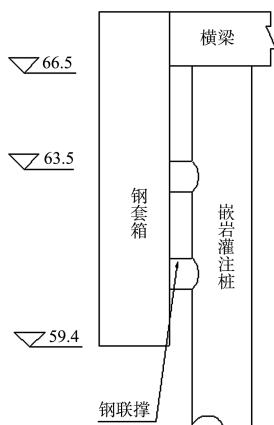


图 1 浮式系船柱设置 (单位: m)

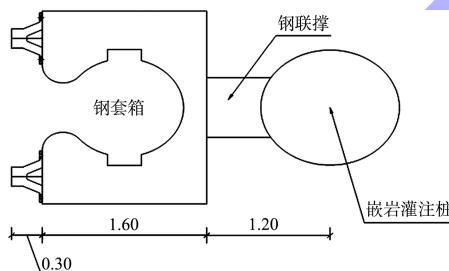


图 2 钢套箱平面结构 (单位: m)

钢套箱作为浮式系船柱升降时的导向、受力及传力构件并应用于内河高桩码头，国内鲜有报道。浮式系船柱及钢套箱所受荷载需通过钢联撑传递到桩基及码头结构上，故对钢联撑焊接要求较高，且焊接部位在水下，必须在无水状态下焊接方能满足设计要求。设置围护挡水结构是实现无水状态下焊接的重要手段，但不同围护挡水结构的技术要求、适用范围、工程投资等差异巨大，采用合理可行的围护挡水结构是实现钢套箱水下干施工的关键。本文从分析围护挡水结构现状与特点入手，进而研制出一种经济合理、技术可行的框套顶压水下施工装置，并通过工程应用制定出一套施工工艺。

## 2 现有围护挡水结构现状及特点

### 2.1 筑坝式围堰

筑坝式围堰主要包括草土围堰、土石围堰、混凝土围堰、钢板桩围堰等<sup>[1]</sup>，是应用最为广泛的围护挡水形式，具有挡水标准高、结构稳定可靠、干地作用面积大等优点。缺点是施工工期长、占地范围及断面尺寸大、工程规模及投资大、拆除清理工作量及难度大。

### 2.2 钢围堰

钢围堰主要包括钢套箱、钢吊箱围堰<sup>[2]</sup>。钢套箱围堰为无底围堰结构，需坐落在河床底部并与河床共同挡水，对河床承载力要求较高。钢吊箱围堰为悬吊在水中的有底围堰结构，当施工部位高于河床底部较多时，利用该结构可降低结构的挡水高度，有效控制围堰结构规模，节省工程投资。因钢吊箱围堰所受荷载无法传递到河床底部，故结构受力复杂。与筑坝式围堰相比，钢围堰具有断面尺寸小、占用水域面积小、施工方便快捷、工程投资较低等优点<sup>[3-4]</sup>。

### 2.3 附着式结构

附着式结构包括自浮式气压沉柜、拱式围堰、附壁式水下施工装置等，这类结构的特点是需附着在已有水工结构表面并与其共同挡水。气压沉柜的优点是排水彻底、无渗漏，但工作舱内压力须大于 1 个大气压 (101.3 kPa) 与水深压力之和，不利于作业人员身体健康，且人员、材料、机械进出需通过过渡舱中转，耗时较长<sup>[5]</sup>。拱式围堰为一种空心半圆形钢筒结构，结构侧面与已有水工结构表面接触，底部坐落在河床上，该装置可在水工结构表面形成从河床底部到水面以上的竖直方向干地施工作业面，特别适用于水库大坝结构垂直方向贯通性缺陷的一次性处理<sup>[6]</sup>。附壁式水下施工装置为固定在水工结构表面的钢结构，其 3 个侧面和底部封闭、另一个侧面固定在已有水工结构表面、顶部敞开且位于水面以上，具有“围护挡水+结构受力+模板”的三重功能<sup>[7-8]</sup>。

### 3 框套顶压式水下施工装置研制

#### 3.1 设计思路

通过对现有筑坝式围堰、钢围堰和附着式结构的技术经济综合分析,受钢吊箱和附着式结构形式的启发,研制了框套顶压水下施工装置。

该装置由挡水结构和受力结构 2 部分组成,如图 3 所示。挡水结构侧面四周封闭、顶部敞开、底部预留与圆柱直径相匹配的圆孔。挡水结构为 2 个半圆加直接段的类似椭圆形、螺栓连接的剖分结构,连接处设置橡胶止水;参考船机螺旋桨的止水方式,底部预留孔与桩基之间设计成 2 个半圆形的止水环拼接。受力结构呈井式布置并与挡水结构连接,起到承担并传递施工荷载的作用。该装置具有以下特点:1)挡水结构底部预留与圆柱直径相匹配的圆孔,便于止水设置,从而实现装置与圆柱之间的有效接触及共同挡水;2)挡水装置采用垂直方向的剖分结构,便于圆柱钢套箱安装完毕后装置的拆除与重复使用;3)装置挡水剖分结构的接触面均为钢结构,加工误差小,止水效果好;4)井字形布置的承载结构可有效承担并传递装置所受荷载。

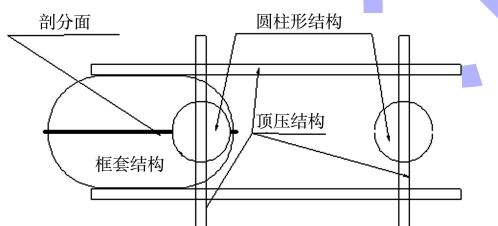


图 3 框套顶压装置

#### 3.2 装置设计

##### 3.2.1 挡水结构

###### 3.2.1.1 总体设计

挡水结构平面尺寸由钢套箱尺寸、钢套箱与桩基钢护筒间距、焊接作业空间、施工安全性及便利性等因素综合确定,装置规模直接决定工程投资,故在满足施工条件时应尽量控制装置尺寸的大小。

1)平面设计。分析本工程特点可知,挡水结构与桩基钢护筒及钢套箱之间的空间具备人员上下及焊接作业条件,不需另行预留空间。因此挡水装置与桩

基钢护筒、钢套箱之间的最小间距按 0.1 m 控制,确定的平面尺寸为:两侧半圆形结构直径 2.6 m,直线段长 1.9 m,围护结构平面面积 10.25 m<sup>2</sup>。

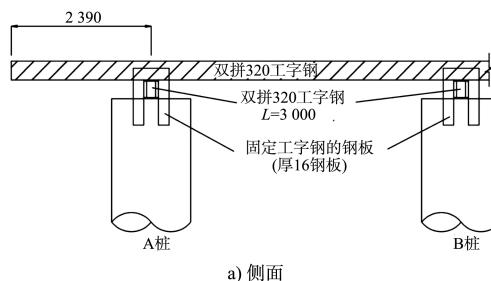
2)高度设计。考虑到焊接部位较高,装置内部少量积水不会影响到焊接作业,故以钢套箱以下 10 cm(59.3 m 高程)作为挡水结构底高程。经现场调查,工程施工期间水位不会超过 65.5 m 高程,装置顶部高程按 65.8 m 设计,装置总高 6.5 m。

##### 3.2.1.2 结构设计

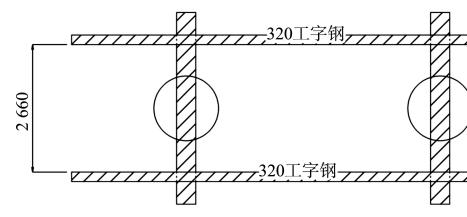
通过挡水水位、吊装作业、施工荷载等结构受力的分析计算,确定以吊装作业工况进行结构设计。挡水结构采用厚 1 cm 加肋钢结构,结构外侧按间距 0.5 m 布设高 15 cm 加肋板,结构质量 7.514 t。为便于螺栓连接及止水安装,剖分面按间距 0.3 m 布置螺栓孔,并设置厚 5 mm 橡皮止水。

##### 3.2.2 受力结构

采用主次梁相结合的井式框架结构,将挡水装置荷载传递到相邻的 2 根嵌岩灌注桩。2 根主梁长 12 m、间距与挡水结构宽度一致,主梁与装置间 1.9 m 直线段上均匀设置 3 个受力点。2 根次梁长 3 m,设置在相应的桩基中心线处。主梁、次梁及挡水结构接触部位采用厚 16 mm 钢板焊接,主次梁受力结构均采用高 32 cm 双拼工字钢结构,总质量 7.524 t,见图 4。



a) 侧面

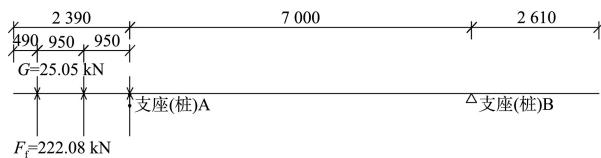


b) 平面

图 4 顶压式水平钢结构 (单位: mm)

### 3.2.3 桩基结构安全验算

本装置所有荷载均需传递至桩基结构，承担向上的作用力，为此需进行桩基结构安全验算，桩基结构受力如图5所示，图中A桩为安装钢套箱结构的外侧桩，B桩为共同受力的内侧桩。经分析，最不利工况为装置内水体全部抽空时挡水结构所受上浮力最大的工况，其中最薄弱环节为A桩的桩基与基岩结合面。



注： $F_f$  为挡水结构浮力； $G$  为挡水结构自重力。

图5 桩基结构受力 (单位: mm)

#### 3.2.3.1 计算模型及结果

连续梁所受荷载为挡水结构浮力  $F_f$  及自重力  $G$ ，梁下部以支座A、B为支点、通过铰接方式与桩A、B相连。根据JTS 167—2018《码头结构设计规范》， $F_f$  设计分项系数为1.3，考虑该工况为短暂状况，取1.2；此时  $G$  为有利作用，其分项系数为1.0。挡水结构作用时连续梁上最大弯矩设计值及其分布见图6。

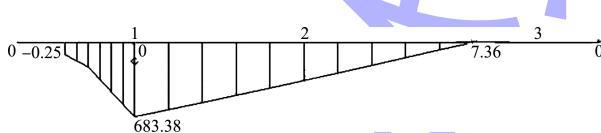


图6 挡水结构作用时连续梁上最大弯矩设计值及其分布  
(单位: kN·m)

#### 3.2.3.2 结果分析

1) 连续梁抗弯能力。根据JTS 152—2012《水运工程钢结构设计规范》，连续梁的最大应力设计值为：

$$\sigma = \frac{M_x}{\gamma_x W_{n,x}} \quad (1)$$

式中： $\sigma$  为梁的弯曲应力； $M_x$  为弯矩设计值； $\gamma_x$  为截面塑性发展系数； $W_{n,x}$  为对  $x$  轴的净截面模量。计算得连续梁最大应力为214 MPa，小于钢材的抗弯强度215 MPa，梁的抗弯能力能够满足规范要求。

2) 支座承载能力。对支座A进行分析，其最大受力为压桩 822.65 kN、拉桩 110.65 kN。本工程采用桩径1.2 m、嵌岩深度3.6 m的嵌岩桩，其抗压、拔能力最小设计值分别为15.17、5.58 MN，远大于计算所得支座最大反力，能够满足规范要求。

### 4 框套顶压水下施工装置应用

某直立式高桩码头5套浮式系船柱钢套箱安装工程计划工期60 d，应用本装置后实际工期仅31 d，施工高效、经济合理、技术可行。该工程利用600 t平板驳船辅以50 t履带吊进行作业，施工前将框套顶压装置、浮式系船柱钢套箱和轮胎履带吊提前吊入驳船，整个施工过程全部水上作业，施工工艺流程见图7。

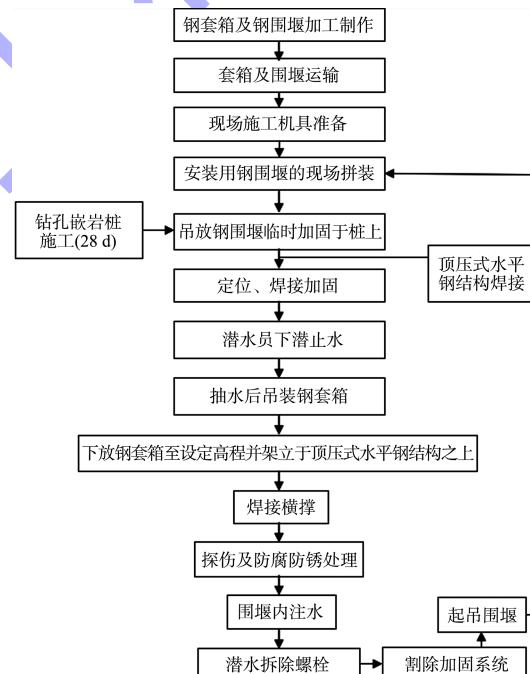


图7 施工工艺流程

主要施工要点为：

1) 框套顶压装置安装。主要包括：①挡水结构安装。在平板驳船上进行拼装，垂直向及环向拼接处设置橡皮止水，螺栓紧固；②挡水结构下放。利用履带吊将挡水结构沿桩基缓慢下放到河床底部并采取临时固定措施；③受力结构焊接。先将次梁采用16 mm钢板与桩基钢护筒焊接，再

在次梁顶部焊接主梁，将主梁作为钢围堰吊挂的前、后支撑点；④框套顶压装置固定。受力结构焊接完毕后，利用四点起吊方式上提挡水结构，使其沿桩基缓缓上移到与受力结构次梁牛腿接触后，停止起吊并与次梁焊接。

2) 潜水螺栓紧固及检查堵漏。框套结构与顶压装置接触面焊接完毕后，在挡水结构外侧将预留圆孔处止水环螺栓拧紧，同时检查、紧固其它部位螺栓，并用棉花自挡水结构外围进行漏水封堵。

3) 挡水装置抽水控制。为确保施工时桩基结构安全，采取 2 次抽水控制方式，即第 1 次抽水至 62.0 m 高程，进行钢套箱吊装及第一级钢联撑焊接，利用底部预留水体减少桩基所受浮力；第一级钢联撑焊接完毕，利用钢套箱自重力抵抗部分上浮力，再抽水至 60.0 m 高程，进行第二级钢联撑焊接。

4) 框套顶压装置拆除。先充水使挡水结构内外水位齐平，利用钢丝绳将挡水剖分结构作为 2 个独立的受力单元，分别固定在受力结构主梁上且使钢丝绳处于受力拉紧状态，切割工字钢牛腿使挡水结构与受力结构脱开，从底部到顶部依次拆除挡水结构所有螺栓及螺帽。

## 5 结论

1) 本装置较好地解决了圆柱结构表面设置围护挡水装置时存在的挡水以及承担并传递施工荷载作用两大问题。采用剖分式框套挡水结构有利于挡水装置的安装、拆除及重复利用，进一步提高了装置的使用效率、降低了工程造价。该装置

(上接第 191 页)

- [3] BOILE M, THEOFANIS S, SDOUKOPOULOS E, et al. Developing a port energy management plan: issues, challenges, and prospects [J]. Transportation research record, 2016, 2549 (1): 19-28.
- [4] LI Y Q, LI J, LI H B. Study on influencing factors of energy consumption and energy efficiency evaluation methods of port mobile machinery [C]//4th International

经济合理、技术可行、施工高效，可为类似工程技术问题的解决提供参考。

2) 因本装置顶压结构固定在已有圆柱结构顶部，圆柱结构须承担本装置施工期间的所有荷载特别是装置上浮力的作用，不利于圆柱结构稳定。因此，采用本装置时必须进行最不利施工荷载作用下的圆柱结构稳定验算、加强施工过程控制，确保圆柱结构的安全。

## 参考文献：

- [1] 夏仲平. 水利工程施工围堰技术进展[J]. 人民长江, 2005, 36(11): 1-2.
- [2] 广西路桥工程集团有限公司. 钢套箱及钢吊箱围堰设计与施工技术规范: DB 45/T 2119—2020[S]. 南宁: 广西市场监督管理局, 2020.
- [3] 孙洪滨, 周和平. DDC 开敞式水下混凝土无水检修装置研究与应用[J]. 水利建设与管理, 2008, 28 (10): 55-57.
- [4] 梁新礼. 明珠湾大桥双壁钢吊箱围堰下水技术[J]. 世界桥梁, 2019, 47(6): 26-30.
- [5] 周和平, 刘兆正, 房向阳, 等. 水下检修装置的新发展[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(6): 64-66, 83.
- [6] 赵妍, 王荣鲁, 张家宏, 等. 大坝上游面水下修补—浮式拱围堰技术[C]//中国水利学会. 第十一届全国水工混凝土建筑物修补与加固技术交流会论文集. 北京: 中国水利水电出版社, 2011: 45-50.
- [7] 张勇, 郑卫力, 古建生, 等. 一种附壁式框筒水下施工装置: CN201210439114. 7[P]. 2013-05-08.
- [8] 许惠敏, 张勇, 周丽娜, 等. 葛洲坝船闸浮门浮式系泊装置方案研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2006, 25(6): 496-499.

(本文编辑 王传瑜)

- Symposium on Power Electronics and Control Engineering (ISPECE 2021). Nanchang: SPIE, 2021: 1037-1043.
- [5] 廖益波. 港口能耗监管系统的研究[D]. 厦门: 集美大学, 2016.
- [6] 郭旭, 刘磊磊. 港口用能设备能耗在线监测系统构建技术方法研究[J]. 水道港口, 2018, 39(6): 746-752.

(本文编辑 赵娟)