

# 大型箱涵气囊法浮运安装工艺

董立业, 李德洲, 张海锋

(中交一航局第二工程有限公司)

**摘 要:** 为了实现裕龙岛海水排水设施箱涵的出运和安装, 提出了在箱涵仓格内填充气囊助浮“浮运”安装箱涵的气囊法浮运安装工艺, 以解决 2 000 吨级大型箱涵出运安装的难题。施工过程中还提出了使用简易滑道代替临时码头出运箱涵, 组合式测量塔架进行箱涵水下定位, 定位驳卷扬机拉合箱涵, 真空泵抽气回收助浮气囊等一系列新方法、新工艺。经过理论计算和实际应用, 证明了该工艺切实可行。气囊法浮运安装工艺具有低成本、高质量、高效率等优点, 具有较大的实用价值, 可在类似大型预制箱涵安装工程中推广应用。

**关键词:** 取排水工程; 混凝土预制箱涵; 气囊助浮; 水上起重

## 0 引言

随着传统水运建设的逐步饱和, 以核电为代表的清洁能源产业以及集成化、规范化的大型石化产业园区, 带动取排水工程成长为水工建设行业新的增长极。目前, 核电站、发电厂或者新兴化工产业园等项目的取排水工程大多采用预制钢筋混凝土箱型暗涵或管涵(简称箱涵)的形式, 单孔或两孔结构, 质量多在 1 000 t 以内。混凝土预制构件的水上安装一般采取陆上预制+驳船运输+起重船吊装的施工方式, 需要的施工设备较多。如果预制构件重量较大, 则往往需要起重船靠泊码头进行起吊转运, 需借用码头或修建临时码头, 增加工程造价及不确定因素。

气囊法浮运安装大型箱涵通过在箱涵侧面及仓格内填充助浮气囊, 使箱涵入水能够自主起浮并具备足够的浮运干舷。拖轮拖运箱涵至安装位置后, 起重船挂钩, 部分气囊放气至箱涵重力略大于浮力, 箱涵产生下沉趋势。因气囊的助浮作用, 400 吨级起重船即能完成 2 000 吨级箱涵的起吊安装。

## 1 大型箱涵浮运安装工艺

### 1.1 起重船或半潜驳出运安装工艺

大型化后的排水箱涵出运安装的传统工艺采用 2 000 吨级起重船在预制场装甲板驳, 运输至施工现场后, 再使用 2 000 吨级起重船吊装安装。或者建设台车沟、出运码头, 使用半潜驳出运箱涵至施工现场, 再使用 2 000 吨级起重船吊装安装箱涵。这 2 种工艺需要投入大型船机, 船机设备现场定位、挪船频繁, 施工效率低, 船机拖带避

风费用高、风险大。同时, 2 000 吨级起重船以及半潜驳成为了项目履约的核心设备, 导致项目履约受到了潜在制约。

### 1.2 钢封门或钢浮箱助浮工艺

钢封门或钢浮箱助浮工艺与气囊助浮工艺相比, 具有施工成本高、灵活性差的缺点。钢封门或钢浮箱自重更大, 需采用更大或更多的浮箱提供足够的浮力。而且, 钢封门或钢浮箱的安装、拆除工艺复杂, 箱涵安装后需潜水员配合, 水上起重吊装拆除施工成本高、效率低。

### 1.3 气囊法浮运安装工艺

气囊法浮运安装工艺能够实现大型箱涵海上浮运拖航及安装, 且施工安全可控, 作业效率高。主要体现在以下方面: 1) 气囊自重小, 且为柔性构件, 安拆相对简单、高效, 且不需要大型船机设备的配合; 2) 气囊充气后能够最大化充盈箱涵仓格, 进而提供最大的浮力。若气囊充满箱涵仓格后提供的浮力仍不满足要求, 箱涵两侧可以再对称绑扎助浮气囊进一步增大浮力; 3) 箱涵安装时, 气囊排气不仅比钢封门或钢浮箱开闸压水更可靠, 还可以采用真空泵抽真空的形式辅助; 4) 气囊的造价相对低廉, 现场施工能够多采购备用, 出现磨损及时更换, 不影响浮运安装的工期。

## 2 工程概况

裕龙岛炼化一体化项目(一期)海水排水设施预制海域段排水箱涵共计 122 榀, 单榀箱涵尺寸 24 m×18 m×5.0 m, 5 孔一组, 单孔断面尺寸 4 m×3 m。每榀箱涵质量约 1 820 t。预制箱涵横断面图如图 1 所示。

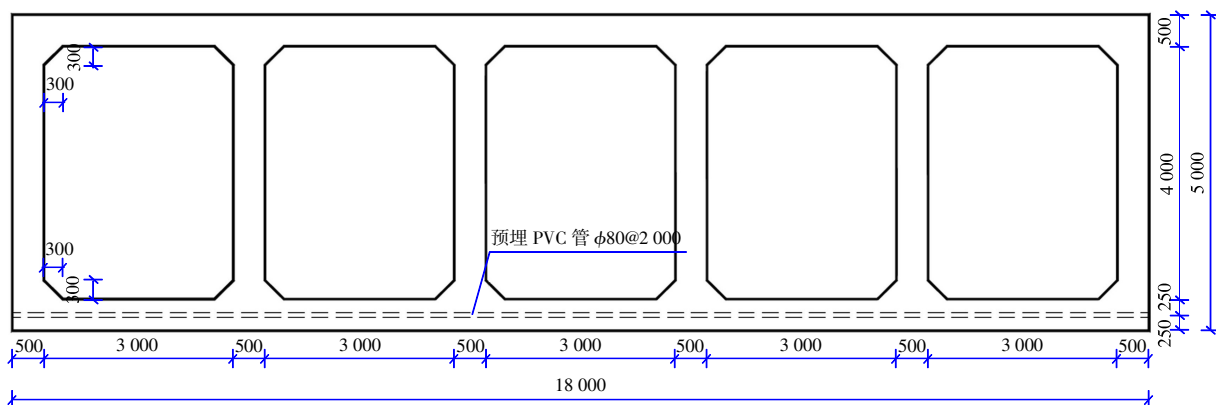


图 1 预制箱涵横断面图(mm)

大型混凝土预制箱涵采用传统的半潜驳接岸出运、大型起重船吊装工艺, 船机投入较多, 受潮汐等环境制约大、施工工效低。经过对比分析采用气囊法浮运安装大型箱涵安装工艺。

### 3 施工关键技术

#### 3.1 施工参数

##### 3.1.1 气囊浮力

每个仓格内布置 4 条长度 23 m、直径 2.0 m 的气囊, 气囊充气后截面理论状态如图 2 所示。4 条气囊在箱涵仓格内的截面填充率为 94.3%(气囊理论截面积  $2.787 \text{ m}^2$ ; 箱涵仓格尺寸  $3 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ , 倒角  $0.3 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$ )。气囊充气后中间近似柱体、两端为锥头, 总长度为 23.5 m, 中间柱体长度为 21 m。海水条件下单条气囊的助浮力为 600 kN。气囊锥头近似为锥体, 单侧长度为 1.25 m。锥体部分产生的浮力为 95 kN。

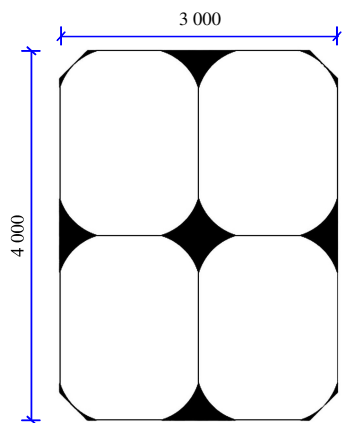


图 2 气囊截面示意图(mm)

因箱涵内填充的气囊无法达到图 2 的理论状态, 实测仓格内填充气囊的截面面积比理论值小  $0.5 \text{ m}^2$ , 即浮力损耗为 123 kN。

综上, 每条气囊实际产生的浮力为 593 kN。

#### 3.1.2 箱涵浮运干舷高度

##### 1) 箱涵总浮力

5 个仓格总共填充 20 条助浮气囊, 气囊总助浮力为 11 860 kN。由于实际预制的箱涵工程量与理论量存在偏差, 因此使用最不利于施工的数据来计算箱涵浮运安装时的受力。根据单榧箱涵实际浇筑混凝土方量为  $710 \text{ m}^3$ , 混凝土理论密度为  $2.407 \text{ t/m}^3$ , 计算单榧箱涵混凝土质量约为 1 710 t。单榧箱涵钢筋质量为 115 t。

考虑箱涵全部没入水中的极限状态, 箱涵自身浮力为 7 428 kN。

综上, 完全入水后箱涵总浮力  $F_{\text{浮}}=19288 \text{ kN}$ 。

##### 2) 箱涵安装总重

单榧箱涵自身质量为 1 825 t。

4 个吊环以及导向座、导向架、测量塔架基座等总质量为 1.9 t。单条气囊质量 1.75 t, 20 条气囊助浮时, 箱涵安装总重量  $F_{\text{m}}=18620 \text{ kN}$ 。

##### 3) 干舷高度

干舷高度计算公式为:

$$h=(F_{\text{浮}}-F_{\text{m}})/g\rho_{\text{海水}}/S$$

式中:  $F_{\text{浮}}$  为箱涵完全入水后的总浮力, kN;  $F_{\text{m}}$  为箱涵安装总重, kN;  $g$  为重力加速度, N/kg, 取  $10 \text{ N/kg}$ ;  $\rho_{\text{海水}}$  为海水密度,  $\text{t/m}^3$ , 取  $1.025 \text{ t/m}^3$ ;  $S$  为安装箱涵的底面积,  $\text{m}^2$ 。

经计算, 干舷高度  $h=15 \text{ cm}$ 。

考虑理论计算与实际存在偏差, 为保证施工安全, 进行箱涵浮运安装典型施工时, 箱涵外侧再安装 2 条助浮气囊。根据典型施工的理论干舷与实际干舷高度对比, 确定施工时箱涵是否安装箱涵外侧助浮气囊。

箱涵外侧助浮气囊不受仓格填充限制,气囊提供助浮力为 600 kN。每条直径 2 m 的助浮气囊增加干舷高度为 13.6 cm。箱涵外侧安装 2 条助浮气囊时,箱涵干舷高度为 42.2 cm。

### 3.1.3 箱涵安装参数

箱涵安装采用四点吊计算,箱涵吊环采用  $\phi 75$  mm 圆钢加工,吊环横向间距 18 m,纵向间距 15 m。吊装钢丝绳采用单根长度 36 m 的 6 $\times$ 37 (a)1 670 MPa 的  $\phi 66$  mm 纤维芯钢丝绳,四点吊环采用 100 t 卡环。气囊助浮标准段箱涵相关计算如下:

#### 1) 吊装钢丝绳长度

吊环的横向间距为 18 m,纵向间距为 15 m。吊装钢丝绳的长度为 36.0 m,计算箱涵吊高为 34.04 m。

此时,计算钢丝绳夹角为  $38^\circ < 60^\circ$ ,满足施工要求。

#### 2) 钢丝绳吊力

箱涵安装时未考虑两外侧助浮气囊状态下,抽掉中心的 1 孔 4 条气囊,其余气囊不变,根据计算,安装时箱涵干舷的高度为 15 cm。单条气囊助浮力为 593 kN,取抽出中间仓格 4 条气囊的极限状态,起重船吊力为 1 704 kN。采用 4 点吊按 3 点受力计算,取 4 倍安全系数,计算单根钢丝绳受力为 2 404 kN。选用 1 670 MPa 的  $\phi 66$  mm 纤维芯钢丝绳,最小破断力为 2 460 kN,满足吊装要求<sup>[1]</sup>。

#### 3) 卡环选用

气囊助浮标准段箱涵吊重 1 704 kN,使用 4 个 1 000 kN 卡环安装箱涵,满足施工要求。

#### 4) 箱涵安装圆钢吊环

根据规范计算得圆钢许用应力 210 MPa<sup>[2]</sup>,采用  $\phi 75$  mm 的 Q235 圆钢,四点吊按 3 点受力计算,圆钢吊环总承载力为 5 564 kN。箱涵安装吊重为 1 704 kN,满足使用要求。

## 3.2 施工流程

### 3.2.1 箱涵舾装

箱涵下水前,将填充气囊和外挂助浮气囊安装到箱涵内外,充气打压至 0.12 MPa,气囊上配备回收缆绳及充放气管。箱涵顶部安装测量定位塔架及测控设备并测量标定。

### 3.2.2 箱涵下水浮运

箱涵溜放下水时,预制台座端头的 2 台 10 t

卷扬机通过滑道中部的转向地锚牵拉箱涵至滑道斜坡段。箱涵至斜坡段具备下滑趋势后,使用滑道口两侧的 2 个 25 t 卷扬机拖拽箱涵顶部 2 个安装吊环,控制箱涵溜放下水的速度。箱涵下水起浮前,拖轮靠近箱涵带缆,箱涵拖航由 1 艘主拖轮+2 艘辅助拖轮进行组编<sup>[3]</sup>。主拖轮带龙须缆吊拖箱涵,2 艘辅助拖轮协助控制箱涵姿态,拖航速度控制在 0.5 kn。

### 3.2.3 箱涵安装

用拖轮将箱涵拖运至安装地点,在离定位驳约 150 m 时,主拖轮开始减速,与 1 艘辅助拖轮配合从侧向拖拽箱涵靠近定位驳,另 1 艘辅助拖轮协助控制箱涵姿态,定位驳带缆至箱涵吊点,完成箱涵靠泊定位。箱涵靠定位驳就位后,定位驳绞缆至待安装位置粗定位。起重船需顺箱涵安装轴线站位,绞移至定位驳后吊装箱涵<sup>[4]</sup>。由于箱涵平行靠定位驳,而箱涵安装时需垂直于定位驳站位,因此需通过起重船前后挂钩将箱涵完成 90° 旋转。

起重船与箱涵使用交叉缆绳连接,控制箱涵安装姿态。准备就绪后,先拆除箱涵外侧助浮气囊,之后开始将中间孔的 4 条气囊同步放气,放气标准以起重船吊钩受力约达到 1 000 kN 为准,4 条气囊不排空气体、不抽出仓格,放气过程根据箱涵姿态调整放气次序及速度。沉放过程中,通过箱涵安装测控系统动态监测、调整箱涵平面位置及姿态,控制箱涵尾部优先着床,以利后续拉合。

箱涵尾部着床后,使用定位驳卷扬机拉合箱涵挤压止水带约 5 cm,起重船下放箱涵直至完全着床,使待安装箱涵与已安装箱涵实现对接,潜水员水下检查对接端高差及错牙情况,复核测控系统数据,满足要求后方可解除起重船吊索具。

### 3.2.4 器具回收

气囊采用自然放气+真空泵方式组合放气。由于气囊长度达 23 m,自然放气无法将气囊尾部气体排出,尤其是上坡段箱涵大量尾部气体无法排出导致气囊难以拔出,可采用真空泵连接导管通入气囊内将气囊尾部气体排净。回收气囊施工时,使用定位驳上固定的卷扬机将气囊抽出,吊机起吊装运输船倒运回预制场。

潜水员水下拆除测量塔架螺栓,配合定位驳上的吊机吊装回收测量塔架至运输船。运输船驳

运至下水滑道处,由陆上吊机倒运测量塔架和气囊上岸至舾装区再次舾装下一樁箱涵。

#### 4 应用效益

通过全面的技术研究、典型施工、工艺优化及实践验证,建立了一套大型箱涵气囊法浮运安装的施工工艺,目前该项目已成功完成了裕龙岛炼化一体化项目排水箱涵的施工,安装质量均满足设计规范要求。根据测控系统数据显示,箱涵安装误差可控制在 $\pm 30$  mm内,满足设计要求。箱涵下水和出运安装可同步施工,安装效率保证在1樁/d,连续施工的高峰期先后创造了2 d安装3樁、4 d安装7樁、单日安装2樁的施工纪录。从箱涵预制到箱涵出运安装形成了整套流水施工,水陆同步进行,气囊法浮运安装工艺有效保证箱涵安装效率,降低船舶投入,保证了项目技术经济效益。

#### 5 结语

裕龙岛炼化一体化项目采用气囊助浮解决

2 000吨级大型箱涵出运安装问题,为项目履约打下了坚实的基础。该工艺在实施过程中也存在一些不足之处。测量塔架的设计需采用加大塔架基座直径、焊接三角斜撑等方法,保证测量塔架的刚度及稳定性,进而保证测量精度。仓格内浮运气囊回收时,抽真空后气囊回收效率提高,但气囊抽真空耗时较长,抽真空时应采用多台大功率真空泵同时抽气,提高气囊的回收效率。气囊法浮运安装工艺填补了国内2 000吨级以上大型箱涵海上浮运安装研究的空白,为大型预制构件的水上出运安装提供了新思路,可供类似项目借鉴应用。

#### 参考文献:

- [1] GB/T 20118—2006,一般用途钢丝绳[S].
- [2] JTS 152—2012,水运工程钢结构设计规范[S].
- [3] 宁进进. 外海超大型沉管拖航演练研究[J]. 中国港湾建设, 2018, 38(10): 12–15.
- [4] 孙壮,别社安,李伟,等. 箱筒型基础结构气囊出运方法[J]. 中国港湾建设, 2014(5): 1–4.