

充气式橡胶打捞浮筒在世越号沉船打捞中的应用

赵殿华

山东南海气囊工程有限公司, 山东 济南 250200

摘要: 充气式橡胶打捞浮筒是由气囊技术创新而开发的用于沉船打捞等领域提供浮力的工具, 通过在韩国世越号沉船打捞工程中应用, 阐述了产品在性能参数的技术设计要点和方法, 介绍了橡胶打捞浮筒的结构特点、工程应用及发展趋势。

关键词: 打捞浮筒; 橡胶; 世越号

引言

韩国世越号沉船事件备受世界各国瞩目, 同样, 三年后由中国企业成功打捞韩国世越号沉船出水也受到全世界的关注。韩国世越号沉船的打捞工程主要由上海打捞局实施, 在整个613天的打捞过程中, 将沉在44米深重达1万余吨的沉船整体打捞上岸, 作业环境复杂, 打捞作业艰难, 创造了打捞史上的奇迹。在世越号打捞工程中, 需要能提供较大浮力的工具, 钢制浮筒因体积大重量重导致应用不方便, 要实现方便水下安装操作, 同时对船体起浮、减少起吊力有较大的效果, 充气式橡胶打捞浮筒就满足了这种要求^[1]。

1 概况

1.1 打捞浮筒的应用点

世越号沉船打捞采用整体打捞方案, 需要采用整体钢梁托底的方式提升出水, 然后整体移运到指定码头上岸。工程的难点在水下的整体钢梁托底, 在船底部如何穿入钢梁成为关键中的关键, 也是工程的难点。打捞工程初步设计的方案采用在船体绑扎安装浮筒配合浮吊来进行船体的抬升, 以便下部留有空间从而穿入钢梁。

在后期船体提升中, 按照打捞工程中对浮力的需求, 需要在托底钢梁的两端固定浮筒, 几根钢梁共同依靠一个浮筒实现提升, 钢梁两侧对称受力, 再配合水面浮吊实现提升作业, 浮筒的采用是以减轻整体提升载荷为目的。

1.2 初步技术要求

对采用的橡胶打捞浮筒提出的初步技术要求如下:

- 1) 浮筒直径为3m, 总长度23m, 总浮力约150ton;
- 2) 浮筒安装2"充气阀和排气阀, 并布置2个以上安全阀; 安全阀工作压力为1bar;
- 3) 充气阀上设置单向阀, 防止充气管路破裂造成气囊漏气。
- 4) 在水下45m深度工作, 充气最大压力要到5bar以上, 压差通过安全阀控制在1bar, 需要安全阀能灵敏地打开和关闭;
- 5) 提升过程中, 需要通过安全阀自动排气来保证安全, 安全阀排气到一定程度后要确保自动关闭。

1.3 研发设计要点

依据传统的船用气囊产品技术特点和标准, 已经远远不能满足橡胶打捞浮筒的要求, 尤其在充放气控制方面提出了更高的要求, 需要结合当前的船用气囊技术特点进行技术创新, 研发橡胶打捞浮筒的新技术, 开发新产品。

通过改进筒体橡胶帘布的原材料配发及改用更高强度的骨架材料, 提高了帘子布层之间的粘合特性和承载能力; 设置保证筒体气密性的结构, 将气密性标准由原船用气囊标准的1小时压降不大于5%提高到一个月压降不大于5%, 提高了30倍; 通过设计制作大型的成型工装和硫化运输设备, 能够满足生产直径3.5m、长度30m浮筒产品的成型和硫化需求, 同时

为后期生产 5m 甚至更大直径浮筒预留发展空间,突破了船用气囊标准中直径 1.8m 以上成型困难的障碍^{[2] [3]}。

1.4 参数与标准

针对打捞工程中的需求,设计了充气式橡胶打捞浮筒,规定了主要性能参数:

- 1) 助浮力: 浮筒完全在水中时可提供的净浮力;
- 2) 直径: 工作压力下浮筒圆柱段的直径;
- 3) 长度: 工作压力下浮筒的轴线总长度, 包含两端集成充放气装置所占轴端长度;
- 4) 工作压力: 安装适应的工作水深设计, 分低压 50kPa 和高压 100kPa 型两种。
- 5) 充放气接口尺寸: 用于连接充气管的接口, 一般为 1"、1.5"或 3";
- 6) 固定点数量: 根据需要确定, 同时与网套吊带受力载荷相匹配。

据此形成了企业标准, 同时编写完善形成了橡胶浮筒的产品标准 T/CDSA-202.2-2017 《助浮打捞用充气式橡胶浮筒 第一部分: 设计与生产》, 作为中国潜水打捞行业的团体标准, 并于 2017 年 3 月 15 日公布实施, 以此指导规范橡胶浮筒的产品设计与生产。

表 1 浮筒规格表

规格型号	浮力 (吨)	直径 (米)	总长 (米)	气嘴口径	吊点数量
FT-5	5	1.2	5.5	1 英寸	3
FT-10	10	1.5	7	1 英寸	5
FT-15	15	1.8	7	1 英寸	5
FT-20	20	2	8	1 英寸	6
FT-25	25	2.2	8	1 英寸	6
FT-30	30	2.5	8	1.5 英寸	6
FT-50	50	2.5	12	1.5 英寸	8
FT-75	75	3	12.5	1.5 英寸	8
FT-100	100	3	16	1.5 英寸	8
FT-125	125	3.5	15	1.5 英寸	8
FT-150	150	3.5	17.5	1.5 英寸	8
FT-175	175	3.5	20	1.5 英寸	10
FT-200	200	3.5	23	1.5 英寸	10

2 橡胶打捞浮筒的结构特点

针对打捞工程中的需求, 橡胶打捞浮筒的结构主要包括三方面:

2.1 筒体结构

采用两端椭球体、中间圆柱体的外形结构, 其中间圆柱段的成型工艺借鉴了船用橡胶气囊产品, 而两端的椭球体成型工艺借鉴了充气式橡胶护舷产品。两端的椭球体能充分利用轴线长度上的筒体体积, 克服了船用气囊 60° 锥头体积利用率低的情形。筒体两端的充放气气嘴采用内嵌模块化设计, 方便与外部的集成充放气装置的接口连接, 充分体现了当前气囊技术在打捞浮筒筒体成型工艺上集成和创新[4]。

2.2 浮力传递固定装置

将浮筒产生的浮力传递到被助浮提升的打捞物上, 需要一种连接两者的装置且能适应浮筒的柔性变化, 采用“工程气囊的网套结构”专利技术而设计的尼龙吊装网套解决了这个问题, 实现了浮力传递的新方式, 通过网套将筒体全身包裹起来, 根据起吊位置和载荷要求

设置固定吊点的位置及许用载荷的尼龙吊带，满足浮筒水下安装、充气过程等环节的柔性变化要求，在后续产品设计和使用中不断完善，形成了“网格式网套”技术，为水下安装操作提供更便捷的施工方法。



图 1 200 吨充气式橡胶打捞浮筒产品图

2.3 集成充放气装置

浮筒的充放气要满足水下操作的要求，而且更重要的必须有安全装置，提高安全性和工作可靠性。考虑充气管路破裂、充气阀体堵塞、内压超过工作压力、排气故障等意外事件的发生，设计了具有多种阀体功能的集成充放气装置，配置了单向阀、手动应急排气阀、充气阀、安全阀、泄压阀等，保证了使用中的安全性。

3 产品性能参数设计计算

3.1 压力

浮筒内充高压气体，为柔性的高压容器，一旦爆破将严重威胁人身及工程安全，因此对安全性能要求非常高。

根据压力容器设计规范，应采用 3 倍以上安全系数，同时，客户的技术要求爆破压力大于 500kPa。浮筒的爆破压力计算方法结合了液压编织胶管爆破压力计算方法和实际试验的经验数据^[5]，其采用的计算公式为：

$$P_1 = \frac{1.33Kb \cdot i \cdot C}{D \left(1 + \frac{\varepsilon}{i}\right)}$$

在上式中：

Kb ：骨架材料规格，锦纶 1400Dex3 线的断裂强力为 294N；

i ：浮筒的层数；

C ：层间修正系数，考虑了层厚与囊体直径的比例关系， $C = 1.05 - 0.047i$ ，

D ：浮筒的直径，在这里取 3.5m；

ε ：线材的扯断伸长率，在这里取 21%即 0.21；

P_1 ：浮筒的理论爆破压力，单位 kPa；

则计算结果为：

当层数为 12 层时， $i = 12, C = 1.05 - 0.047 \times 12 = 0.63$

$$P_1 = \frac{1.33Kb \cdot i \cdot C}{D \left(1 + \frac{\varepsilon}{i}\right)} = \frac{1.33 \times 294 \times 12 \times 0.486}{3.5 \times \left(1 + \frac{0.21}{12}\right)} = 639\text{kPa} > 500\text{kPa}$$

当采用薄膜应用理论计算方法时，推导出的压力计算公式为

$$P_2 = \frac{189.6i}{D} \cdot (1 - \delta)$$

P_2 : 浮筒的理论爆破压力，单位 kPa;

δ : 修正系数，为层数的百分比， $i\%$

当层数为 12 层时， $i = 12, \delta = 12\%$

$$P_2 = \frac{189.6i}{D} \cdot (1 - \delta) = \frac{189.6 \times 12 \times (1 - 12\%)}{3.5} = 572\text{kPa} > 500\text{kPa}$$

根据上述两种方法计算的结果，当浮筒为 12 层时，都能满足爆破压力不低于 500kPa 的要求。

3.2 浮力

3.2.1 浮力计算方法

浮筒采用球形端部设计，缩短轴向长度的同时提高了助浮力，克服了锥形端部的空间利用率低的缺点。计算浮筒的浮力就是计算浮筒排开水的体积重量，净浮力时还需要排除筒体的自重影响。

浮筒的浮力计算公式为：

$$\begin{aligned} \text{总浮力 } G_0 &= \frac{\pi D^2}{4} L_e + \frac{\pi D^3}{8} \\ \text{净浮力 } G &= G_0 - 0.3G_1 - 0.68G_2 \end{aligned}$$

在这里：

L_e : 筒体圆柱段的长度，m;

G_1 : 筒体和网套的自重，ton;

G_2 : 气嘴阀件及卸扣连接金属件的自重，ton;

3.2.2 大浮筒浮力

本工程中采用的大浮筒是直径 3.5 米，圆柱段长度为 21 米的浮筒。

$$\text{总浮力 } G_0 = \frac{\pi D^2}{4} L_e + \frac{\pi D^3}{8} = \frac{\pi \times 3.5^2}{4} \times 21 + \frac{\pi \times 3.5^3}{8} = 201.9 + 14.96 = 216.86 \text{ ton}$$

设 $G_1 = 5, G_2 = 0.5$ ，则

$$G = G_0 - 0.3G_1 - 0.68G_2 = 216.86 - 0.3 \times 5 - 0.68 \times 0.5 = 215 \text{ ton}$$

即该浮筒的助浮力为 215ton。

3.2.3 小浮筒浮力

本工程中采用的小浮筒是直径 3.5 米，圆柱段长度为 17.5 米的浮筒。

$$\text{总浮力 } G_0 = \frac{\pi D^2}{4} L_e + \frac{\pi D^3}{8} = \frac{\pi \times 3.5^2}{4} \times 17.5 + \frac{\pi \times 3.5^3}{8} = 168.25 + 14.96 = 183.2\text{ton}$$

设 $G_1 = 4.5, G_2 = 0.5$ ，则

$$G = G_0 - 0.3G_1 - 0.68G_2 = 183.2 - 0.3 \times 4.5 - 0.68 \times 0.5 = 181.5\text{ton}$$

即该浮筒的助浮力为 181.5 吨。

3.3 紧固吊带载荷

浮筒在水中充气后通过网套实现吊点的挂接固定，按照客户的技术要求，吊点的水平位置间隔距离为 3.5m。

吊点数量设为 n ，则每个吊点的载荷为

$$F_0 = G/n$$

考虑水中的动载荷情况，取动载系数 $k = 1.2$

则单个吊点的载荷为

$$F = k \cdot F_0 = kG/n$$

3.3.1 大浮筒的载荷

对于大浮筒， $n = 6$

$$\text{则单个吊点的载荷为 } F = k \cdot F_0 = \frac{kG}{n} = 1.2 \times \frac{215}{6} = 41\text{ton}$$

3.3.2 小浮筒的载荷

对于小浮筒， $n = 5$

$$\text{则单个吊点的载荷为 } F = k \cdot F_0 = \frac{kG}{n} = 1.2 \times \frac{181.5}{5} = 43.56\text{ton}$$

综上，选用的吊带的许用载荷至少 43.56 吨，在这里将网套中的用于吊点的主吊带选取许用载荷为 45 吨的扁平吊带。

3.4 安全阀排气性能

根据要求，安全阀的排气开启压力为 110kPa，密封压力为 100kPa，满足提升速度按 1 分钟 1 米的水压高程，即差值 10kPa 下需排气量为：

$$P_1V_0 = P_2V_0 + P_0V$$

其中：

P_1 为抬升前的浮筒内压力； P_2 为抬升 1 米后的浮筒内压力； P_0 为标准大气压力；

V_0 为浮筒的排开水的体积，由于压差小，假设提升过程中浮筒体积是不变的。

V 为排出的气体体积；

对于大浮筒：

排气体积为 $V=0.01 \times 217=2.17 \text{ m}^3$ ，折合为每秒约 36L；安装两个安全阀，则每个安全阀的排气量为每秒 18 L。

对于小浮筒：

排气体积为 $V=0.01 \times 183=1.83 \text{ m}^3$ ，折合为每秒约 31 L；安装两个安全阀，则每个安全阀的排气量为每秒 15 L。

安全阀需同时满足上述要求，则其排气量要求为每秒不小于 36 L。

经过对现场设计的某一安全阀进行试验测试采集数据如表 2^[6]。

表 2 阀体排气量数据表

安全阀口径	4"	气体初始总体积	70m ³
安全阀开启压力	25kPa	阀体最大开启高度	9mm
排气峰值压力	75.2kPa	最大排气瞬时速度	707 L/s
累计时间 t/min	排气体积 V/m ³	节点压力值 p/kPa	节点瞬时速度/L/s
1	21.97	48.6	360
2	25.92	42.9	216
3	27.93	40.0	154
4	29.24	38.1	121.8
5	30.6	36.2	102
6	31.3	35.2	86.3
7	32.6	33.3	77.6
8	33.9	31.4	70.6
9	34.5	30.5	63.9
10	35.9	28.5	59.8
11	36.5	27.7	55.2
12	37.8	25.7	52.6
13	38.5	24.7	49.3
14	39.2	23.8	46.6
15	40.5	21.9	44.9

由数据可知，在压差 10kPa 时即压力为 35kPa 的排气速度为每秒 86.3 L/s；

按上述计算的结果要求，在压差 10kPa 下瞬时排气量至少为 36 L/s，因 86.3 L/s 远大于 36 L/s，可判断安全阀满足排气要求。

也可按在压差 20kPa 下即压力为 25+20=45kPa 时的瞬时排气量至少为 72kPa，在 45kPa 时的试验数据也大于理论数据，也可判断安全阀满足排气要求。

上述表格中的数据是基于空气中进行的排气试验，由于大气压的恒定与水中提升时安全阀的背压不同，在水中的试验数据需进行试验，测试已验证该配置和结论的正确性。

3.5 吊带在浮筒外壁拉压变形的分析

在实际应用中，针对吊带和筒体之间的接触强度，进行了计算分析；主要目的是：在大载荷下，吊带拉压对浮筒外壁的囊体产生变形的强度分析，估算承载力^[7]。

假设条件：

内部气体压强的均匀性；变形的连续性；完全接触面；

如图 2 所示建立分析模型。

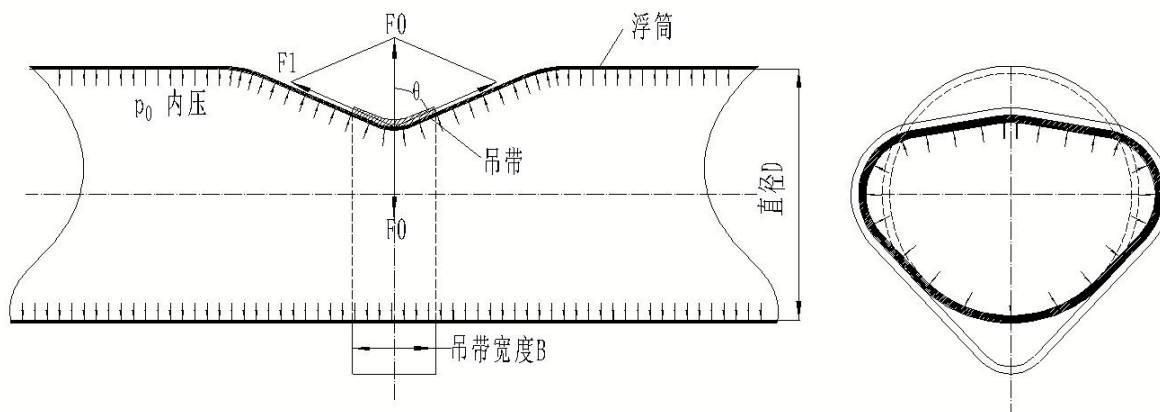


图 2 放大变形的吊带勒紧囊体外壁产生的变形示意图

3.5.1 浮筒变形前的承载力

设浮筒直径为 D ，内压为 P_0 ，吊带的宽度为 B ，假设吊带在浮筒接触的部位为圆筒的上半部分，则由内压产生的力，在未变形前的承载力为：

$$F_p = B \cdot D \cdot P_0$$

3.5.2 产生变形后的承载力

当吊带上的拉力足够大时，接触面产生的压强大于内压时，浮筒接触部位发生变形，拉力越大，变形越大；变形后，浮筒壁厚上的纵向上，由骨架材料来承担过多的拉力，此时承载力为

$$F_0 = 2F_1 \cos\theta$$

F_1 为接触部位纵向骨架材料的承载力。

由上述估算的承载力为：

$$F = F_p + F_0 = B \cdot D \cdot P_0 + 2F_1 \cos\theta$$

按浮筒骨架材料布局及强度，可推算出纵向骨架材料的最大承载力为

$$F_1 = 540\pi D$$

骨架材料受到吊带的剪切，按剪切力分析，推算骨架材料的抗拉强度约为 $\sigma_0 = 296\text{MPa}$ ，剪切强度为 $\tau_0 = 89\text{MPa}$ ，壁厚为 δ ；按照刚性材料的剪切力分析有

$$\tau = F / \delta D \leq \tau_0$$

3.5.3 实际受力状态分析

本次打捞工程中，浮筒的工作压力为 $p_0 = 100\text{kPa}$ ，浮筒直径 $D = 3.5\text{m}$ ，吊带宽度为 $B = 100\text{mm}$ ，吊带的承载载荷按 50 吨（ $F = 500\text{kN}$ ）和 100 吨（ $F = 1000\text{kN}$ ）两种情况。

1) 按骨架材料的最大承载力状态分析

A. 当吊带的承载力为 50 吨时有：

$$500\ 000 = 100 \times 3500 \times 0.1 + 2 \times 540\pi \times 3500 \times \cos\theta_1$$

计算得出 $\theta_1 = 87.8^\circ$

设吊带勒紧后囊体接触变形的影响范围为 5 倍的吊带宽度，则推算的吊带勒紧到囊体的深度为

$$h_1 = 5B \cos\theta_1 = 5 \times 100 \times \cos 87.8^\circ = 19.8\text{mm}$$

B. 当吊带的承载力为 100 吨时有：

$$1000\ 000 = 100 \times 3500 \times 0.1 + 2 \times 540\pi \times 3500 \times \cos\theta_2$$

计算得出 $\theta_2 = 85.3^\circ$

设吊带勒紧后囊体接触变形的影响范围为 5 倍的吊带宽度，则推算的吊带勒紧到囊体的深度为

$$h_2 = 5B \cos\theta_2 = 5 \times 100 \times \cos 85.3^\circ = 40.7\text{mm}$$

C. 吊带最大载荷的估算

当吊带上载荷足够大时，勒到囊体变形的深度足够深时，理想状态下，骨架材料的受力不能承载拉力，从而出现断裂。

此时，变形的影响范围设定为 5 倍的吊带宽度，变形夹角 θ 接近 0° ， F_p 受力很小，完全靠骨架材料的拉力来承载，则有

$$F_{\max} = 2 \times 540\pi \times 3500 = 11868\text{kN}$$

当把内压影响下的拉力约 2880kN 扣除后，能承载的扯断力约 8980kN，远大于 1000kN，能满足拉力要求。

2) 按骨架材料的剪切强度来分析

本浮筒骨架材料折算为纵向的最薄的厚度为 $\delta = 4.4\text{mm}$

则最大承载力为

$$F_{\tau\max} = \delta D \tau_0 = 4.4 \times 3500 \times 89 = 1370\text{kN}$$

扣除内压产生的附加力 35kN，则可承受的最大拉力约为 1335kN，大于 1000kN，能满足拉力要求。

3) 浮筒外层橡胶层的挤压

外层为纯橡胶层，没有骨架材料，抗拉强度为 $\sigma_1 = 10\text{MPa}$ ，估算的吊带力为

$$F_j = BD\sigma_1 = 100 \times 3500 \times 10 = 3500\text{kN}$$

大于 1000kN，能满足拉力要求。

3.5.4 分析的结果

从上述两种分析结果来看：

- 1) 采用窄的吊带，承受拉力时，吊带会勒紧到囊体内，变形产生“糖葫芦”节状态；
- 2) 吊带受力越大，变形的深度越大；
- 3) 骨架材料同时受拉力和剪切作用，建议可承受的最大拉力不要超过 133.5 吨。

5 橡胶打捞浮筒的工程应用与优势

橡胶打捞浮筒在世越号沉船打捞工程中的应用主要在水下进行，根据施工阶段不同的任务要求，浮筒主要实现了三个应用目标：

5.1 船体助浮

在进行船体下部穿钢梁的过程中，需要将船体按照先船尾后船首的顺序和部位分别抬起，然后按顺序将钢梁依次穿入到沉船下并进行安放固定。为减少水面浮吊的起吊力，提高起重物的安全性，需要在船体被吊位置安装一定数量的橡胶浮筒，充气后提供浮力，达到对船体的助浮作用，从而减小起吊力，实现穿钢梁作业。

5.2 船首抬升

在最后的船钢梁环节中，遇到的工作难度和阻力较大，受船体结构特点，不能捆绑固定过多的浮筒来提供足够的助浮力，工程施工方创新技术方案，将“气囊在沉箱顶升移运中的应用技术”结合实际，在沉船下打通一通道，然后穿入浮筒，通过向内部充气 and 充水的方法，浮筒内部形成压力，体积膨胀来抬升船体的高度，使其抬升离开海床一定高度，满足穿钢梁空间需求，从而再顺利穿入钢梁。

采用浮筒充水的方法减少了浮筒在水下的浮力，起到稳定浮筒减少因海床不平或洋流冲刷而产生的移动不稳现象；浮筒内部充少量气体，可以有效实现浮筒受船体压缩而产生的筒体内部空气压缩变化，从而对船体外壳起到低压保护和缓冲作用。

5.3 整体提升时的助浮

在采用钢绞线起升系统对沉船进行整体提升时，捆绑固定在钢梁两侧的浮筒提供了一定的浮力，从而减小提升系统提升力；而在船体出水一定高度后，可以将浮筒作为缓冲装置使用，也就是在沉船和提升驳船之间放置的浮筒起到了充气式护舷的作用，降低两者之间的缓冲碰撞。

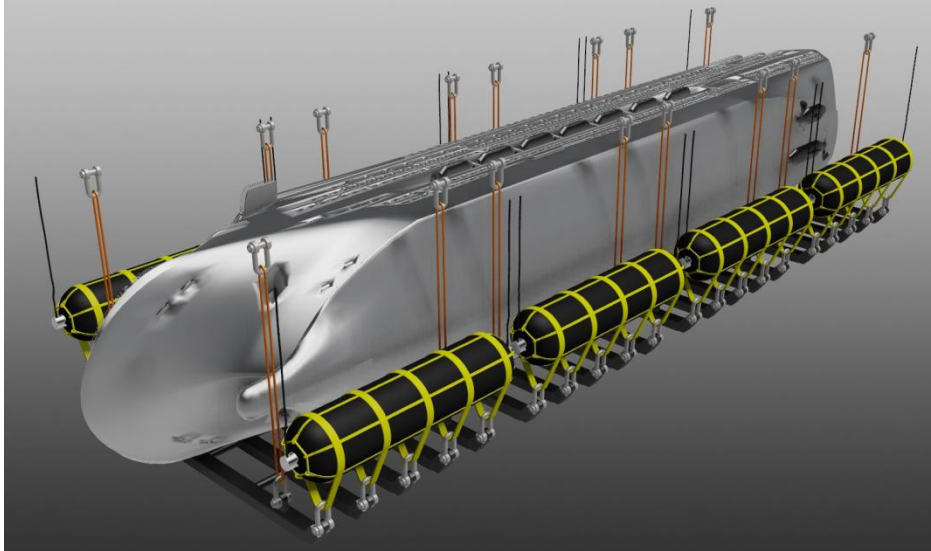


图 3 沉船整体打捞提升示意图

5.4 优势

橡胶打捞浮筒是一款创新技术的产品，随着在打捞工程的应用，特别在世越号沉船打捞工程中的应用，推广应用的市场潜力巨大。随着各种打捞工程对浮筒的逐渐应用，更多的客户提出了差异性的工程需求，结合这些要求，统一技术方案，规范使用要求，从而形成产品的标准化，形成系列产品。

之所以采用橡胶浮筒，其与钢制的打捞浮筒具有明显的性价比优势^[8]：

1) 性能优势：

钢制浮筒的自重较大，单位钢质量与提供的浮力相比，其值约 0.3 以上，也就是每吨浮力需要 0.3 吨以上的钢材；橡胶浮筒提供的浮力比可达 0.03，也就是每吨浮力仅仅需要 30 公斤的自重，具有明显的优势。

2) 建造优势：

钢制浮筒的设计需要按照压力容器的标准和相关工艺、检验标准执行，在建造过程中占用场地大，钢材需求量大，建造周期长，建造难度大；橡胶浮筒工作压力低，不需要安装压力容器的标准设计制造，橡胶具有柔性，通过缠绕来成型，建造场地小，需求的材料用量少，建造容易。

3) 成本优势：

钢制浮筒因其重量大、建造工艺复杂，所花费的人工成本比较高；橡胶浮筒重量轻，材料成本低，周期短，人工耗费低。综合比较，对于钢制浮筒每吨浮力成本在 8000 元左右，而橡胶浮筒仅 2000 元左右。

4) 使用优势：

钢制浮筒重量重，体积大，占用的空间大，移动运输需要专业的起吊设备和运输设备，在工作安装时操作繁琐，从安装到实现浮力过程长，打捞作业操作流程复杂，而且使用后需要专门的存储场地，定期专门维护，维护费用高；橡胶打捞浮筒具有重量轻、柔性可折叠的优势，能提供 200 吨浮力的橡胶浮筒自重仅 5 吨，折叠后其占几平方，移动运输方便，水下安装重量仅 1 吨，充放气操作方面，安装固定作业流程简单，使用后折叠存放即可，维护费用低。

当然，橡胶浮筒也有自身的劣势，比如抗刺扎性差，橡胶的老化特性决定了使用频次不

会太长久等, 这点问题的解决仍需要随着产品的不断改进完善, 如目前设计的带盔甲的橡胶浮筒基本解决了抗穿刺性差的问题等。

7 结语

橡胶打捞浮筒提供了一种创新的浮力解决方案, 通过以世越号打捞工程应用形成了新的市场需求, 进行了产品的技术设计, 从生产制造到试验验证, 形成了自由的产品标准, 不仅在打捞领域能够应用, 而且在海工船舶、码头隧道建设等领域的导管架安装、海管铺设、箱涵安装、沉箱安装等领域有较大的应用前景。

参考文献:

- [1] 陈海峰, 王建梅. 柔性浮筒打捞新技术[J]. 中国水运, 2000(12):15
- [2] 刘汉明, 等. 浮筒充气量与充气时间计算方法研究[J]. 中国航海学会救捞专业委员会 2003 年学术交流会议论文集, 2003
- [3] 林福治, 钢质浮筒的自然减重问题[J]. 中国航海学会救助打捞专业委员会学术交流会, 1993
- [4] 王绍清, 朱珉虎. 高承载力多层揉压气囊的研制与使用[J]. 中外船舶科技, 2006(01):8-10
- [5] 朱珉虎. 船舶气囊下水的理论与实践[J]. 中外船舶科技, 2013(02):25-30
- [6] 成小飞, 曹亮. 船舶气囊下水工艺中气囊承载性能影响因素分析[J]. 港口科技, 2012(08):34-36
- [7] 余龙等. 船用气囊力学特性及极限承载力分析[J]. 上海交通大学学报, 2014, 48(8):1072-1077
- [8] JTT, 824. 1-2011 钢制打捞浮筒, 第 1 部分: 建造[S]