

深水FPSO吸力锚建造工艺

张耀, 汪春标, 闫运强, 韩辉, 赵献

海洋石油工程(青岛)有限公司 山东青岛 266520

摘要: 以某深水浮式生产储卸油装置(FPSO)的吸力锚建造为例,对吸力锚的钢制筒体、顶盖结构、内部切泥板、铸造吊耳及锚链等主要结构预制安装流程与吸力锚整体装船工艺进行阐述。研究结果表明:深水FPSO吸力锚在建造过程中通过制定合理的施工顺序、严格控制组对尺寸公差和焊接参数等措施,对整个项目的质量管控和工效提升至关重要,也为后期同类大型管状结构物的建造提供了有益的参考。

关键词: 吸力锚; 钢制筒体; 顶盖结构; 附属结构; 装船

Construction process of deep water FPSO suction anchor

ZHANG Yao, WANG Chunbiao, YAN Yunqiang, HAN Hui, ZHAO Xian

Offshore Oil Engineering (Qingdao) Co., Ltd., Qingdao 266520, Shandong, China

Abstract: This article takes the construction of a suction anchor for a deep-water floating production storage and unloading unit (FPSO) as an example, and elaborates on the prefabrication and installation process of the main structures of the suction anchor, including the steel cylinder, top cover structure, internal mud cutting plate, casting lifting ears, anchor chains, and the overall loading process of the suction anchor. The research results indicate that during the construction process of deep-water FPSO suction anchors, it is crucial to establish a reasonable construction sequence, strictly control the dimensional tolerances and welding process parameters of the assembly, and improve the quality control and efficiency of the entire project. It also provides useful reference for the construction of similar large tubular structures in the later stage.

Keywords: suction anchor; steel cylinder body; top cover structure; affiliated structure; loading construction

1 序言

吸力式基础平台是近年开发出的一种新型海洋平台,因具有多种优越性而受到各国石油公司的重视^[1]。吸力锚作为浮式生产储卸油装置(FPSO)海底系泊装置,整体为顶端封盖、底端敞开的钢制圆筒,顶端留有抽吸法兰孔。海上作业时,将吸力锚吊装沉入海底泥面,吸力锚在自重作用下入泥一定深度,然后使用顶端的吸力泵将钢制圆筒内海水抽

离,通过钢制圆筒内外水压差将吸力锚向下全部压入泥面,直至吸力锚内部顶盖结构与泥面接触。

我国对吸力锚的研究和应用主要集中在系泊方面,利用吸盘与泥面强大的吸力,为海面上移动的船只或其他漂浮物提供固定位置的拉力。吸力锚原理,在20世纪60年代提出,70年代后期进行了原理性试验,在80年代初首先在欧洲北海投入工程应用,适合油船系泊的全方位锚固能力的要求,施工

第一作者:张耀,高级工程师,主要从事海洋石油工程建造技术管理工作, E-mail: zhangyao5@cooec.com.cn。

简便，并且可以回收重复使用^[2]。

对于吸力锚的制造，国内部分海洋工程公司已经成功实施若干例，但是对于整个吸力锚的建造工艺却鲜有相关文献可查。本文以某深水FPSO吸力锚建造施工为例，对于吸力锚的钢制筒体、顶盖结构、内部切泥板、铸造吊耳及锚链等主要结构预制安装流程与吸力锚整体装船工艺进行阐述，初步形成了标准化建造工艺，为同类项目的施工提供了有益的参考。

2 吸力锚结构形式

本项目吸力锚共计9根，单根重126t，每根直径5.5m、高15.9m，主要结构包含钢制圆筒、顶盖结构、内部切泥板、管式吊点、板式吊点、铸造吊耳和锚链，以及锚链小平台、阳极、法兰等。吸力锚外形结构如图1所示。



图1 吸力锚外形结构

3 吸力锚公差要求

吸力锚公差要求节选自EEMUA 158：2014《Construction Specification for Fixed Offshore Structures》和DNV Ch.2：2018《DNV GL rules for classification；Ships Part 2 Materials and welding Ch.2 Metallic materials》规范，相比于传统制管项目API 2B：2001《Specification for the Fabrication of Structural Steel Pipe》规范，该FPSO吸力锚项目的公差要求见表1。吸力锚主体结构除铸造吊耳为超高强钢ASTM A148 Grade 90-60，其余材料均为普通高强钢DH36/EH36。

表1 吸力锚公差要求

公差类型	最大允许公差
周长公差	30% 板厚与10mm，两者取较小值
端部垂直度公差	外径≤2m：± 3mm 外径>2m：± 5mm
组对错皮公差	重要结构10%板厚 主结构15%板厚 最大值4mm
不圆度公差	25%板厚
直线度偏差	整体长度范围内不超过10mm
同心度	无特殊说明处，最大± 7.5mm
板与板交叉节点组对偏差	0.5倍板厚（板厚为不等壁厚中较薄值）与10mm，两者取较小值
开洞/穿插孔	圆心定位偏差：± 10mm 开孔尺寸偏差：± 5mm
阳极位置偏差/方向偏差	± 300mm/10°
吊点位置偏差/方向偏差	± 15mm/0.5°

4 吸力锚建造及装船技术

吸力锚的建造工作主要分为场外（外委单位）和场内（内部单位）两大部分。场外工作包含锚链和铸造吊耳等成品构件的加工，需要厂家按照技术要求供货。场内工作主要涉及材料的领用、下料预制、安装总装及装船等施工工序。场外和场内工作同步开展，详细的建造工艺流程如图2所示。

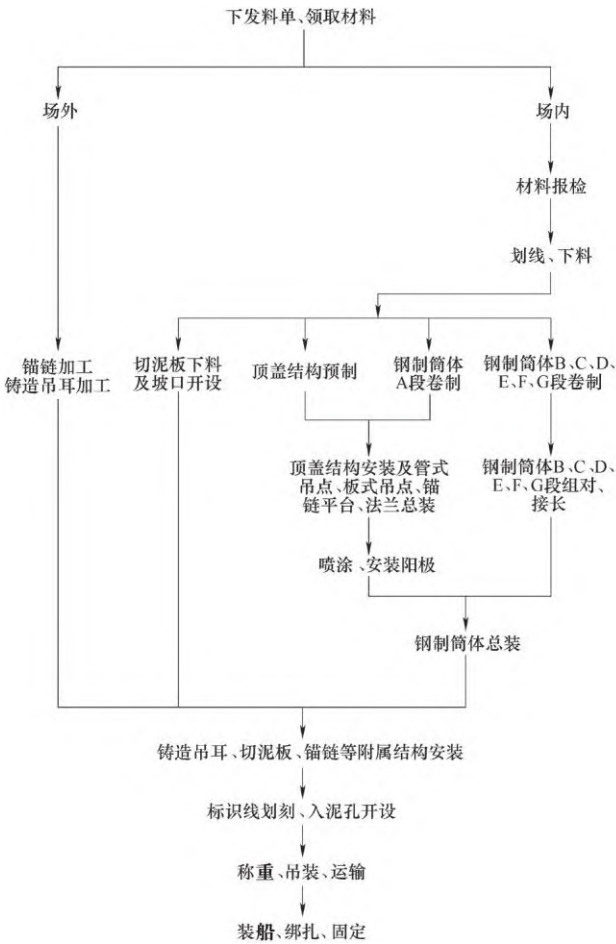


图2 吸力锚建造工艺流程

吸力锚的主体结构为钢制圆筒以及附属结构组成。造管图是建造此类管状类结构的主要施工图样,如图3所示。钢制圆筒分为A~G共9节,其中A节管段、顶盖结构及其附属结构划分为第一圆筒分段,B~C划分为第二圆筒分段,D~G分为第三圆筒分段。图样上明确了所有管段的直焊缝、环焊缝的相对位置和附属结构的安装尺寸,以及车间预制

为了提升工效,3个圆筒分段结构同步开展施工,最终采用正造法将卷制完成的9节管段竖直放置在垫墩上组对拼接(或卧式放置在转胎上组对拼接)后进行现场吊点机械加工,泵机组试装、锚链安装,待吸力锚全部主副结构完成后采用270t平板车运输到码头,利用履带吊翻身、竖向吊装装船。



钢制筒体采用三辊轴卷板机进行卷制,按照卷管要求,上辊轴逐次加压增加下压行程,来回带动

因为钢制筒体尺寸超高超大,单节圆筒柔性变形较大,所以应充分利用车间桥吊资源进行卷管辅助,借助抬杠、板卡等辅助工具,局部调整管径方向塌腰、纵向焊道组对错皮及缝隙较大的难题。卷制后倒运到直焊缝焊接区域,采用埋弧焊接小车进

行内焊缝焊接，外部坡口碳弧气刨清根处理后利用埋弧焊焊接大臂并报检，最后利用25t叉车挑起管段且内部加支撑的方式倒运到总装现场，以规避管段运输变形及倾覆风险。



a) 来料后进行材料验收以及放样划线 b) 切割后卷制

图4 吸力锚钢制筒体管段卷制

4.2 顶盖结构预制

钢制筒体A节管段组装后进行整体喷涂及附属结构安装，如图5所示。根据顶盖结构图样下料、切割钢板，采用正造法拼接顶盖支撑框架的交叉腹板、交叉翼缘板、中心支撑圆管、管式吊点、板式吊点及锚链小平台等结构散件。在支撑垫墩上采用反造法，将吸力锚顶部盖板背面朝上进行拼接。

支撑框架由交叉腹板、交叉翼缘板组成T形材结构，根据图样定位尺寸，在顶盖圆板上进行划线定位，横向5道T形材为贯穿结构，纵向垂直5道T形材为间断结构，内搭接于横向5道T形材内部，腹板与翼缘分别搭接拼焊。采用先中心、后四周的对称焊接，通过段焊和退焊等方式，严格按照焊接工艺要求，控制热输入，并通过在周边增加配重和刚性固定来控制焊接变形。

预制完成的支撑框架翻身吊装至吸力锚顶部盖板上组对焊接，接着将盖板与套入A节管段组装，进行双面全熔透焊接。此环向焊道坡口角度大、焊道长，分4段4人同时焊接，先焊接内坡口，然后在外坡口根部和搭接处进行碳弧气刨清根，去除杂质和缺陷，再焊接外坡口，焊缝施工应对称同时施焊，严格采用焊接工艺和顺序确保将焊接变形控制



a) 正造法拼接顶盖结构散件 b) 顶部盖板翻身拼接

图5 吸力锚顶盖预制安装

到最小。

筒体A节管段主结构预制后吊装翻身直立，根据图样位置安装外侧管式吊点，分为直管段和盖板，可将两者提前预制成整体后，切割直管段马鞍口，然后整体焊接到A节管段两侧，两个管式吊点确保在一条直线上。顶盖板式吊点为常规板式吊点，提前预制主板和耳板，然后机械加工掏孔确保中心对中。顶盖结构中心为法兰孔，需要开孔后进行直管段和法兰的安装，法兰上表面需要机械加工，水平度有严格要求。筒顶锚链小平台为常规三板拼接结构，控制焊接变形以及锚链槽的尺寸精度和光滑度。

钢制筒体A节管段主副结构预制完成后，吊装运输至喷涂车间，对整个吸力锚泥线以上部分喷涂防腐并标号，再根据阳极图样定位均布安装顶部盖板上的阳极块。顶部板式吊点的两孔和顶盖法兰孔，三者在空间安装尺寸上要满足后期抽吸泵的精度要求，需提前预制泵机组模型工装进行试装配，如图6所示。



a) 顶部板式吊点 b) 泵机组模型工装装配测试

图6 吸力锚A节管段喷涂及附属结构安装

4.3 筒体段组对接长

根据吸力锚外形尺寸和结构特点，结合场地能力和建造资源，可选择卧式或立式的方法进行建造和装船作业^[3]。考虑工作项全面开展，钢制筒体A节管段优先预制，B~G节管段在制管车间下料卷制后同步接长，然后与A节管段总装接长，如图7、图8所示。

虽然立式建造占用场地面积小，但在施工过程中吊装工序较多，需采用履带吊连续吊起管段进行吊装翻身和组对，吊装风险较高。施工中对单节管段的组对控制较为严格，组对采用千斤顶和临时焊

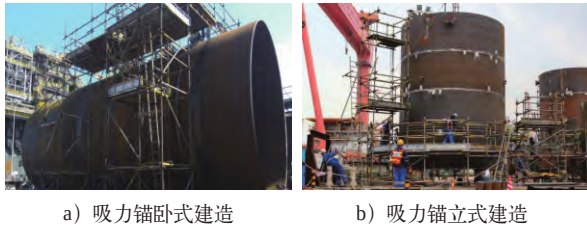


图7 吸力锚钢制筒体B~G节管段的卷制接长

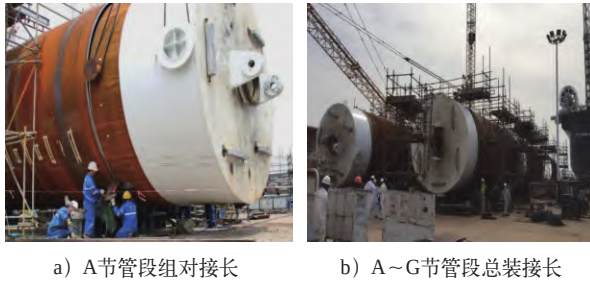


图8 吸力锚钢制筒体A~G节管段总体接长

接码排、楔形板进行管段的错皮和圆度的调整，环焊缝焊接均采用焊条电弧焊，施焊质量和效率难以保证。

卧式建造占用场地面积较大，单节管段横向吊装至转胎上进行依次组对。每节管段布置两组转胎，基准管段布置从动胎，调整管段布置主动胎，依据造管图上管段编号顺序和直焊缝相对定位尺寸，通过转胎转动、丝杠伸缩等方式调整焊缝组对

间隙。因为管段直径尺寸较大，柔性变形大，所以采用临时焊接码排、楔形板调整管段之间错皮、圆度。组对固定封焊后搭设脚手架平台，采用转胎和埋弧焊接小车配合进行半自动焊接内外坡口，多道环向焊缝可同时进行，施焊质量和效率较高。

经施工综合工效对比，吸力锚主体最终采用卧式建造的方式全面开展，实施效果良好。

B~G节管段组对接接长后，吊装翻身A节管段，进行总装接长，最终测量总体尺寸进行报检，并在吸力锚筒体上铺设样板，画标识线。A节管段采用平吊，除去两端的管式吊点，需要额外预制安装两个临时管式吊点，总装接长后切除。

4.4 铸造吊耳、锚链以及切泥板预制安装

吸力锚主筒体管段总装后，根据造管图定位尺寸，在管段上根据造管图定位、围样板划线、掏孔，安装铸造吊耳。

铸造吊耳为意大利进口铸件，材质为超高强钢 ASTM A148 Grade 90-60，化学成分及力学性能见表2、表3。施工前检验材料是否存在气孔、裂纹、夹渣等母材缺陷，且对于100mm厚的钢板，坡口1:4的过渡尺寸较大，不能采用火焰切割，需要外委机械加工，且需对机械加工完成的铸件坡口进行坡口角度测量及MT、UT检测，坡口形式如图9所示。

表2 ASTM A148 Grade 90-60钢的化学成分（质量分数） (%)

C	S	P	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	Si	V	Al	Sn	As	Nb	Ti	Sb
0.107	0.001	0.007	1.465	0.105	1.102	0.053	0.118	0.507	0.018	0.044	0.005	0.006	0.0027	0.0049	0.0024

表3 ASTM A148 Grade 90-60钢的力学性能

板厚/mm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率 (%)	-20℃冲击吸收能量/J
100	577	673	23	39、56、50

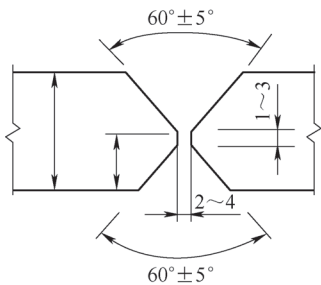


图9 铸造吊耳全熔透坡口形式

由于铸件超高强钢与碳素钢焊接容易产生焊接缺陷，因此施工现场需组织详细技术交底，并严格按照焊接工艺中要求的焊接热输入、焊丝摆宽、干伸长度等参数进行施工，焊接参数见表4。同时，组

织有责任心的焊工和焊接监控人员，加强现场质量管控，针对不合格焊道立即叫停，充分处理后再进行后续焊接；施工过程需严格按照焊后热处理工艺执行，确保热处理质量符合技术要求。铸造吊耳安装如图10所示。

锚链安装时，一端链环通过大尺寸卸扣悬挂到铸造吊耳上，另一端链环需要卡入顶盖结构上的锚链小平台卡槽处，如图11所示。单根锚链重达9t，巨大的锚链和卸扣人工无法移位调整，需用履带吊、汽车吊、叉车配合作业，以及配合转胎不断调整吸力锚筒体的转向90°母线位置，垂直吊装安插到位。锚链要求采用两根绷带绑扎固定，紧贴到吸

表4 焊接参数

焊层	焊接方法	焊接材料牌号	焊丝直径/mm	电源极性	类型	焊接电流/A	电弧电压/V	气体类型	气体流速/(L/min)	焊接速度/(mm/min)	热输入/(kJ/mm)
根部	SMAW	LB-52NSU	3.2	DC(+)	全位置	70~100	18~23	N/A	N/A	40~80	1.5~2.5
填充盖面	FCAW-G	DW-A55LSR	1.2	DC(+)	平焊/横焊	180~250	20~28	Ar+CO ₂	15~25	150~450	1.0~2.0
					立焊/仰焊	170~240	20~27	Ar+CO ₂	15~25	130~350	1.0~2.0



a) 吊耳吊装就位



b) 吊耳组对焊接

图10 铸造吊耳安装



a) 人工辅助锚链就位



b) 多设备配合锚链就位作业

图11 锚链安装

力锚筒体外壁，防止运输过程中因自由滑落而导致重心失稳。

切泥板为吸力锚筒体内部连接铸造吊耳与筒对侧内壁的加强结构，确保筒体入泥后的整体刚度，且有入海切泥的作用。切泥板需在铸造吊耳掏孔时，垂直吊装伸入，组对焊接到一侧管段内壁上，另一侧封盖铸造吊耳，调整另一侧切泥板在铸造吊耳内壁的位置后，采用埋弧小车焊接T形接口。

入泥孔为圆孔，不规则地均布于吸力锚底端，根据造管图尺寸定位划线，喷涂标识线，并采用磁力切割机进行圆周火焰切孔，如图12所示。



a) 切泥板安装



b) 入泥孔开设

图12 切泥板安装及入泥孔开设

4.5 吸力锚装船及固定

吸力锚主附结构总装完成后，吊装至特定的门式运输框架上，一组4个，均布在270t平板车上，绑扎固定后运输至码头前沿就位。在吸力锚倒运期间，提前在运输驳船上预制装船固定吸力锚底座，底座为方形型钢框架结构，上表面平整，固定筋板要求位于驳船的主承力肋位上，如图13所示。



a) 吸力锚倒运



b) 固定底座预制安装

图13 吸力锚倒运及固定底座预制安装

吸力锚倒运路径上要求路面平整，没有障碍物。到码头前沿后，采用两台履带吊平吊抬起翻身。一车悬挂索具通过撑杆过渡，吊索具悬挂吸力锚顶端的两个管式吊点；另一车通过吊带过渡，悬挂吸力锚铸造吊耳；两车平吊抬钩后，悬挂铸造吊耳的吊车落钩，悬挂顶端管式吊点的吊车起钩，同步操作，直至吸力锚在空中承直立状态。将铸造吊耳的吊带摘除，采用单台履带吊垂直吊装装船。

9根吸力锚装船过程涉及两车抬吊装车运输、翻身、称重作业，如图14所示。流水化施工，配合



a) 吸力锚翻身



b) 吸力锚吊装装船

图14 吸力锚翻身及吊装装船

度高，施工难度较大，需严格按照吊装运输方案执行，统筹考虑吊机、索具、人员配合，安排技术人员和安全人员重点监督全作业过程。

吸力锚吊装到对应的装船固定底座上，焊接固定筋板，要求位于框架型钢肋位上，全熔透焊接，UT检测合格后，出海安装，如图15所示。



图15 吸力锚底座固定

5 结束语

本文详细描述了吸力锚主副结构的建造工艺，介绍了两种吸力锚筒体建造方式，重点描述了吸力锚分步建造流程。吸力锚管径尺寸大，附件吨位重，安装尺寸定位公差要求严格，组焊过程变形孔控制及流水化施工对整个项目的质量管控和工效提升至关重要。各施工工序的同步开展和逐步推进，以及方案工艺的优化，为吸力锚高效建造奠定了基础，为后期同类大尺寸、大吨位管状结构物项目的施工提供了有益的参考。

参考文献：

- [1] 鲁晓兵，郑哲敏，张金来. 海洋平台吸力式基础的研究与进展[J]. 力学进展，2003（1）：27-40.
- [2] 徐继祖，史庆增，宋安等. 吸力锚在国内近海工程中的首次应用与设计[J]. 中国海上油气（工程），1995，7（1）：32-35.
- [3] 王丽勤. 深水吸力式基础施工方案探讨：“第十六届中国海洋（岸）工程学术讨论会”论文集（上册）[C]. 北京：海洋出版社，2013：284-289.

MW 20240409