

深水工程船吸力锚锚点结构设计

徐田甜¹ 高德欢² 张美荣³

1. 中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300459;
2. 中海油安全技术服务有限公司, 天津 300452;
3. 海洋石油工程股份有限公司, 天津 300451

摘 要:深水油气田工程船(以下简称深水工程船)采用半张紧式多点系泊系统,海底吸力锚锚点结构设计应保证系泊安全。介绍了工程船所属公司的企业标准对系泊系统和吸力锚锚点设计、海上安装的技术要求;应用 ARIANE 7 软件计算了工程船的最大平面位移和系泊线的最大张力;应用数值迭代求解控制微分方程分析了海底链嵌入土中的反悬链线形态,确定了吸力锚锚点处的系泊荷载;应用 ABAQUS 软件分析了吸力锚筒体以及锚点的结构强度和稳定性,计入了连接器对锚点主板的杠杆效应,并考虑了吸力锚筒内 V 形翼板建造侧向变形的影响;锚点采用了低碳硅锰铸钢材质,通过热处理控制保证机械和耐磨性能。吸力锚锚点结构设计可为类似深水工程船吸力锚设计提供借鉴。

关键词:吸力锚;铸钢锚点;海上安装误差;有限元分析;热处理

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2022.03.017

Structural design of suction pile anchor pad eye for deep water engineering vessel

XU Tiantian¹, GAO Dehuan², ZHANG Meirong³

1. CNOOC China Ltd., Tianjin Branch, Tianjin, 300459, China;
2. CNOOC Safety Technology Service Co., Ltd., Tianjin, 300452, China;
3. China Offshore Oil Engineering Company, Tianjin, 300451, China

Abstract: The semi-taut spread mooring system is adopted for deep water engineering vessel, and the structural design of anchor pad eye on suction pile shall guarantee mooring safety. This paper introduces the technical requirements of mooring system and suction pile anchor pad eye design and offshore installation in the Company's General Specifications. The maximum offset of engineering vessel and tension of mooring line is calculated by ARIANE7 software. The inverse catenary shape of bottom chain embedded in soil is analyzed by numerical iterative solution of governing differential equations method so as to determine mooring load at anchor pad eye on suction pile. The structural strength and stability of suction pile caisson and anchor pad eye is analyzed by ABAQUS software, in which the link's lever arm effect on anchor pad eye main plate is simulated, and the influence of lateral fabrication deformation of V-wing plate inside suction pile caisson is considered. The anchor pad eye is made of low-carbon silicon manganese cast steel, with the stress-relief done by heat treatment to guarantee the mechanical and wear resistance properties. This suction pile anchor pad eye design can be used as a reference for engineering design of deep water

收稿日期:2021-09-23

作者简介:徐田甜(1978-),男,湖北石首人,高级工程师,学士,主要从事海洋石油工程研究、设计工作。E-mail:xutt@cnooc.

com.cn

suction pile of the same nature.

Keywords: Suction pile; Cast anchor pad eye; Offshore installation tolerance; Finite element analysis; Heat treatment

0 前言

深水油气田工程船(以下简称深水工程船)通常采用半张紧式系泊系统,其海底吸力锚基础上的锚点处承受着垂向和水平向荷载的作用^[1]。吸力锚因具有水下定位精确、可重复利用、可承受较大水平向荷载和海上安装费用低等优点,已成为深水工程船普遍采用的系泊锚基础型式^[2-3]。

深水工程船服役期间,锚头链嵌入土中的反悬链线形态决定了吸力锚锚点处的系泊荷载^[4]。因工程船系泊系统海上安装误差和系泊线的运动特性,锚点处的系泊荷载与锚点主板可能不共面,即在锚点处产生主平面外的侧向荷载。浅水工程船吸力锚的承载力设计要求较低,锚头链与锚点之间通常采用的卸扣和吊耳/耳环连接形式不能满足深水工程船吸力锚锚点的结构设计要求。为此,深水工程船吸力锚普遍采用铸钢锚点,锚点与锚头链之间采用连接器连接,以提高锚点处结构的耐磨性和疲劳寿命^[5]。某公司制定了《系泊系统设计总则》(以下简称企标 I)、《系泊定位基础结构设计总则》(以下简称企标 II)、《板裙基础和吸力锚设计、安装总则》(以下简称企标 III)、《铸钢结构材料总则》(以下简称企标 IV)等企业标准对吸力锚和锚点的设计提出了技术要求。基于此,对某深水工程船的吸力锚锚点进行结构设计。

1 深水工程船系泊系统设计

1.1 深水工程船系泊线方案

某深水工程船位于热带环境条件温和海域。工程船总长×型宽×型深为 330 m×61 m×33.5 m,作业处水深 1 470 m,系泊定位采用 4 组共 16 根系泊线^[6];每根系泊线由船体链、锚缆、海底链和锚头链构成,锚头链的出土点为理论锚固点(Theoretical Anchor Point, TAP),TAP 与工程船掣链器之间的设计水平距离为 2 100 m。深水工程船系泊线见图 1。

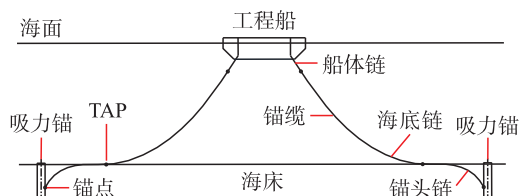


图 1 深水工程船系泊线示意图

Fig. 1 Deep water engineering vessel mooring line

1.2 系泊系统设计控制工况

按照企标 I 要求,深水工程船系泊系统设计采用准静态分析方法和 ARIANE 7 软件,满足 ISO19901-7:2013 *Petroleum and natural gas industries-Specific requirements for offshore structures-Part 7: Stationkeeping systems for floating offshore structures and mobile offshore units* 和 API RP 2SK *Design and analysis of stationkeeping systems for floating structures* 2005(以下简称 API RP 2SK)以及 BV—NR493 *Classification of mooring system* 2012(以下简称 BV—NR493)等规范的要求^[7]。系泊系统设计考虑了系泊线完整、1 根系泊线破断、2 根系泊线破断和锚缆破断、瞬态自存等工况^[8]。百年一遇环境条件工况是系泊系统设计的控制工况,企标 I 要求和设计分析结果见表 1。

表 1 企标 I 要求和设计分析结果表

Tab. 1 General Specifications I requirement and design analysis result

百年一遇环境条件工况	工程船平面位移/水深 企标设计要求	工程船平面位移/水深 设计结果	锚链准动态张力最小安全系数企标要求
系泊线完整	横向≤6.5% 纵向≤5.0%	横向 6.23% 纵向 4.97%	1.75
1 根系泊线破断	≤8.0%	6.86%	1.25
2 根系泊线破断	≤8.0%	7.34%	1.00

深水工程船系泊系统设计按 BV—NR493 和 BV—NI605 *Geotechnical and foundation design* 2014 规范要求,考虑工程船和系泊线的完工状态后,得到的百年一遇环境条件工况时海底链在 TAP 处设计分析结果见表 2。

表 2 海底链在 TAP 处设计分析结果表

Tab. 2 Design analysis result for bottom chain at TAP

百年一遇环境条件工况	海底链在 TAP 处最大准动态张力/kN	海底链在 TAP 处与水平面的夹角/(°)
系泊线完整	6 887	22.7
1 根系泊线破断	9 153	24.8
2 根系泊线破断	14 107	27.7
瞬态自存	15 290	28.6

海底链为 BV QR3 级无档链,直径为 147 mm,无腐蚀和扣除 11.2 mm 腐蚀余量(每年腐蚀 0.4 mm)后的最小破断拉力分别为 15 536 kN 和 13 627 kN。锚缆的最小

破断拉力为 13 900 kN, 为系泊线上最薄弱部件; 瞬态自存工况为百年一遇环境条件时, 任 1 根锚缆突然破断而导致的工程船系泊系统瞬态运动工况。企标 I 要求: 锚缆破断工况时, 海底链在 TAP 处的张力取为锚缆的最小破断拉力; 瞬态自存工况时, 海底链在 TAP 处的张力取为 1.1 倍锚缆的最小破断拉力^[9]。

1.3 锚头链反悬链线形态

吸力锚海上安装时, 锚头链随吸力锚一同入土, 由水下机器人安装海底链和锚头链之间连接器的销后, 海底链和锚头链即连为整段锚链, 再由安装船移位拖拽海底链, 使锚链切割土体; 嵌入土中的锚链受到土体对其的切向力和法向力以及锚链自重力的作用, 形成反悬链线形态^[10], 见图 2。

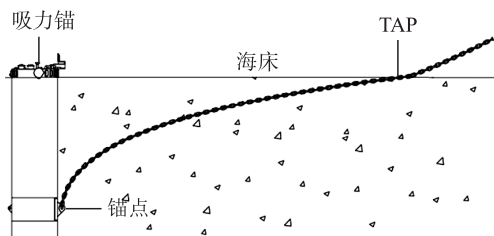


图2 锚头链反悬链线形态图

Fig. 2 Inverse catenary shape of anchor chain

海底链嵌入土中的反悬链线形态与土体的性质有关。深水工程船作业海域的海底为饱和软黏土, 土体的不排水剪切强度 S_u 见表 3。表 3 中 S_l 为土体的灵敏度指数, 即未扰动土体不排水抗剪强度与扰动后土体不排水抗剪强度的比值^[11-12]。

表3 土体不排水剪切强度 S_u 数值表

Tab. 3 Undrained shear strength S_u of soil

海床之下 深度 /m	S_u 下限值 ($S_l = 4.5$)	S_u 上限值 ($S_l = 2.0$)
0.0	0.5	1.5
0.5	7.0	9.0
1.5	5.0	8.0
8.0	10.0	14.0
28.0	33.0	40.0

应用数值迭代求解控制微分方程分析了海底链嵌入土中的反悬链线形态, 得到百年一遇环境条件工况的锚头链在吸力锚锚点处的设计分析结果, 见表 4。由表 4 可见, 锚头链在锚点处与水平面的夹角在吸力锚最佳承载角度范围内^[13], 锚头链在锚点处最大准动态张力比 TAP 处最大准动态张力 (表 2) 降低约 2.7% ~ 4.4%。表 4 的分析结果可作为吸力锚极限承载力和结构分析的基准界面荷载。

表4 锚头链在吸力锚锚点处的设计分析结果表

Tab. 4 Design analysis result for anchor chain at anchor pad eye on suction pile

百年一遇环境 条件工况	锚头链在锚点处与 水平面的夹角 / (°)		锚头链在锚点处最 大准动态张力 / kN	
	S_u 下限值	S_u 上限值	S_u 下限值	S_u 上限值
系泊线完整	31.5	35.0	6 666	6 622
1 根系泊线破断	31.5	33.8	8 940	8 755
2 根系泊线破断	31.5	33.3	13 901	13 723
瞬态自存	32.3	33.7	15 290	15 290

2 深水工程船系泊系统海上安装误差

深水工程船系泊系统设计应考虑海上安装误差的敏感性影响^[14]。按照 API RP 2SK 规范、企标 I、企标 II, 深水工程船系泊系统海上安装误差要求见表 5^[5]。深水工程船锚机调整船体链从掣链器放出的链环数量, 精确调整各系泊线的出线长度和预张力。

表5 系泊系统海上安装误差要求表

Tab. 5 Offshore installation tolerance requirement for mooring system

工程船船体 中心点平面 位置误差 /m	工程船船体 艏向方位角 误差 / (°)	吸力锚中心 点平面位置 误差 /m	吸力锚垂 直度误差 / (°)	吸力锚锚 点方位角 误差 / (°)
$\leq \pm 5$	$\leq \pm 1.5$	$\leq \pm 5$	$\leq \pm 5$	$\leq \pm 5$

吸力锚及锚点结构设计分析考虑吸力锚垂直度安装误差 $\pm 5^\circ$; 锚点处系泊荷载主平面外倾角考虑锚点方位角安装误差 $\pm 5^\circ$ 和系泊线水平面摆动幅值 $\pm 3.5^\circ$, 合计取 $\pm 10^\circ$ 。

3 吸力锚极限承载力校核

根据同一作业海域某深水工程船吸力锚的工程经验, 并考虑吸力锚制造厂的最大卷管能力限制, 吸力锚直径取 6 m。为保证吸力锚与土体之间的摩擦力和土的吸附力, 按照企标 III 要求, 吸力锚在海床之下结构的表面不设防腐涂层, 吸力锚仅在海床之上的外表面设防腐涂层, 其它部位均为裸钢表面。吸力锚极限承载力的归一化“H-V 破坏包络线”^[15-16] 见式 (1)。

$$\left[\left(\frac{H_{\max} \beta_H}{H_{ult}} \right)^a + \left(\frac{V_{\max} \beta_V - W'}{V_{ult}} \right)^b \right]^{1/3} = 1 \quad (1)$$

其中

$$a = 0.5 + L/D = 4.833, b = 4.5 - L/(3D) = 3.056 \quad (2)$$

式中: L 为吸力锚的入土深度, m; D 为吸力锚的直径, m; $H_{\max}$ 、 $V_{\max}$ 分别为锚点处的最大水平向和最大垂向系泊荷载, 按表 4 结果并计入吸力锚垂直度误差 $\pm 5^\circ$ 和锚点方位角误差 $\pm 10^\circ$ 计算, kN; H_{ult} 、 V_{ult} 分别为吸力锚的水平向和垂向极

限承载力, H_{ult} 按 Randolph 提出的方法计算为 26 566 kN^[17], V_{ult} 按 API RP 2 GEO *Geotechnical and foundation design considerations* 2011 规范计算, kN; β_H 、 β_V 分别为水平向承载力安全系数和垂向承载力安全系数, 按企标 II 要求取值; W' 为吸力锚在海水中的浮重, 取 1 734 kN。

吸力锚极限承载力校核结果见表 6, 据此确定吸力

表 6 吸力锚极限承载力校核结果表

Tab. 6 Ultimate holding capacity check result for suction pile

百年一遇环境条件工况	水平向承载力安全系数 β_H	垂向承载力安全系数 β_V	按 API RP 2SK 规范校核最大系泊荷载/极限承载力 UC 值(衡准要求 $UC < 1.0$)	
			S_u 下限值	S_u 上限值
系泊线完整	1.6	2.0	0.851	0.930
1 根系泊线破断	1.2	1.5	0.871	0.904
2 根系泊线破断	1.0	1.0	0.970	0.997



图 3 吸力锚、锚点、锚头链和连接器图

Fig. 3 Suction pile, anchor pad eye, anchor chain and link

4 吸力锚锚点结构设计

本作业海域的吸力锚锚点处曾因吸力锚海上安装的方位角误差较大, 锚头链切割土体而使土体破裂, 造成锚头链与锚点之间的主平面外夹角较大, 锚头链与锚点之间的连接卸扣上发生严重的磨损和磨蚀。为此, 企标 I、企标 II 要求吸力锚锚点应采用铸钢构件。所有永久系泊线上不允许采用卸扣作为连接器, 连接器应为锻造构件。锚头链与锚点主板之间应采用 90°H 型连接器连接, 见图 4。吸力锚结构设计应按 BV—NR445 *Rules for the classification of offshore units* 2013 (以下简称 BV—NR445)、API Bulletin 2U *Bulletin on stability design of cylindrical shells* 2004 (以下简称 API Bulletin 2U) 和 AISC316 *Manual of steel construction: Allowable stress design* 2005 等规范校核锚点筒体结构强度和稳定性^[18]。

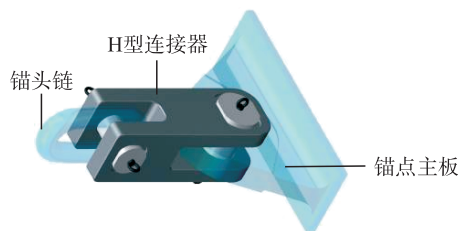


图 4 90°H 型连接器示意图

Fig. 4 90°H-link

锚设计高度为 27 m、入土深度为 26 m、自重质量为 218 t。按照 API RP 2SK 规范, 确定锚点在海底之下深度取吸力锚入土深度的 2/3, 即 17.3 m, 见图 3; 此锚点位置使吸力锚承受系泊荷载后沿水平方向平动, 不发生旋转, 吸力锚的水平向极限承载力最大。

吸力锚筒壁厚为 40 mm (以下简称筒壁 A 区), 锚点处 3 m 高的筒壁厚为 50 mm (以下简称筒壁 B 区), 锚点四周局部筒壁厚为 90 mm (以下简称筒壁 C 区); 吸力锚的锚点主板与翻身吊耳主板连为一体, 并在锚点主板与翻身吊耳主板的两侧采用 V 形翼板支撑筒体, 尽量减少锚点处筒内加强构件对土体的扰动, 见图 5。百年一遇环境条件, 2 根系泊线破断、锚缆破断、瞬态自存等工况时的吸力锚锚点结构许用等效应力见表 7。

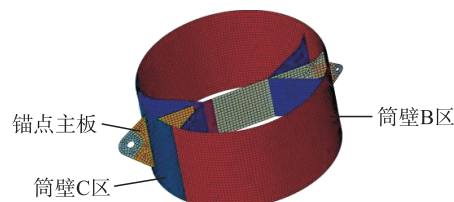


图 5 吸力锚筒内加强构件示意图

Fig. 5 Strengthen structure inside caisson

表 7 吸力锚锚点结构许用等效应力表

Tab. 7 Allowable equivalent stress of anchor pad eye on suction pile

构件	厚度/mm	材质	许用等效应力/MPa
筒壁 A 区	40	DH36	345
锚点处加厚段筒壁 B 区	50	DH36	335
锚点主板周围加厚筒壁 C 区	90	DH36 Z35	315
锚点处铸造加厚筒壁	95	铸钢	345 (外表面) 320 (厚度中心区)
锚点主板 (筒外)	250 ~ 295	铸钢	345 (外表面) 320 (厚度中心区)
锚点主板 (筒内)	90 ~ 250	铸钢	345 (外表面) 320 (厚度中心区)
翻身吊耳主板	90	DH36 Z35	315
锚点与翻身吊耳之间连接板 (筒内)	40	DH36	345
V 形翼板 (筒内)	40	DH36	345

4.1 吸力锚整体结构分析

应用 ABAQUS 软件建立吸力锚整体结构有限元模型,有限元单元类型为 8 节点的 S8R 二次壳单元,网格尺寸为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$;考虑海床冲刷深度为 3 m ,施加锚点处的系泊荷载、土体对吸力锚筒体的法向和切向作用力以及吸力锚的自重荷载;吸力锚底端设为刚性固定边界条件。吸力锚筒体建造完工后的最大直径与最小直径的差值不允许超过 15 mm ;百年一遇环境条件,2 根系泊线破断工况时,锚点处最大变形为 33 mm ,即考虑锚点承载变形和建造尺寸误差的累积,锚点处结构总变形小于 1% 的吸力锚直径,满足 API Bulletin 2U 规范对结构稳定性的要求^[18]。吸力锚筒壁 A 区、筒壁 B 区和筒壁 C 区的最大等效应力分别为 186 MPa 、 297.2 MPa 和 256.3 MPa ,均小于许用等效应力。

4.2 吸力锚锚点加厚段结构分析

应用 ABAQUS 软件建立吸力锚锚点处局部的 7 m 高段结构有限元模型,分析锚点处加厚段筒体及筒内加强结构强度和稳定性,有限元单元类型为 8 节点的 S8R 二次壳单元,网格尺寸为 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$;施加锚点处的系泊荷载,并模拟 90°H 型连接器对锚点主板的杠杆效应,计入锚点处 10° 方位角误差的影响;忽略土体对吸力锚的作用力;有限元模型的筒体顶、底端设为刚性固定边界条件,见图 6。百年一遇环境条件,2 根系泊线破断工况时,锚点处最大变形为 23 mm ;吸力锚的筒壁 A 区、筒壁 B 区和筒壁 C 区的最大等效应力分别为 163.7 MPa 、 303.3 MPa 和 249.1 MPa ,均小于许用等效应力。结构特征值屈曲 (Eigenvalue buckling) 分析的第一阶屈曲荷载因子为 18.678 (大于 5.0),满足 API Bulletin 2U 规范要求^[18]。

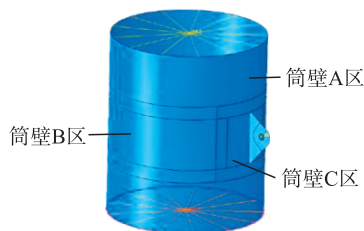


图 6 吸力锚锚点处结构有限元模型图

Fig. 6 Finite element model of anchor pad eye on suction pile

4.3 锚点局部结构分析

应用 ABAQUS 软件建立吸力锚锚点处 V 形翼板支撑筒体、铸钢锚点主板和 90°H 型连接器的局部细化有限元模型,有限元单元类型为 10 节点的 C3D10M 二次四面体单元,在每个构件厚度方向至少有 2 个单元,该单元适用于大变形和接触分析;系泊荷载施加在 90°H 型连接器前端的销上,锚点主板销孔内直径比销直径大

4 mm ,锚点主板销孔与销之间的摩擦系数取 0.16 ,更准确地模拟 90°H 型连接器对锚点主板的杠杆效应,计入锚点处 10° 方位角误差的影响;忽略土体对锚点的作用力;筒体四周和锚点主板根部设为刚性固定边界条件,见图 7;分析百年一遇环境条件,2 根系泊线破断和锚缆破断工况时,铸钢锚点主板及局部相连结构强度,锚点处最大变形分别为 8.0 mm 和 8.2 mm ,最大等效应力分析结果见表 8,均小于 BV—NR445 和 BV—NR493 规范的许用等效应力;锚点主板根部顶端在吸力锚筒内过渡圆弧半径为 200 mm ,锚点主板根部底端在吸力锚筒外过渡圆弧半径为 100 mm 。铸钢锚点与吸力锚筒体连接 K 形坡口焊缝处最大等效应力为 210 MPa 。

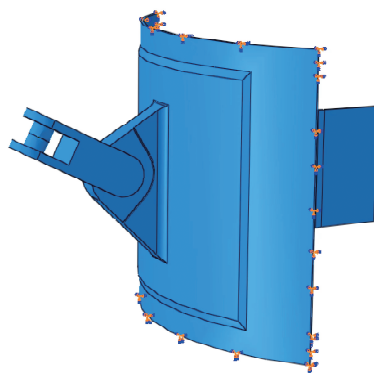


图 7 铸钢锚点局部细化有限元模型图

Fig. 7 Fine finite element model of cast anchor pad eye

表 8 吸力锚锚点结构最大等效应力表

Tab. 8 Maximum equivalent stress of anchor pad eye on suction pile

构件	最大等效应力 /MPa	
	2 根系泊线 破断工况	锚缆破 断工况
锚点主板根部顶端(筒外)	296.1	308.8
锚点主板根部顶端(筒内)	262.2	260.7
锚点主板根部底端(筒外)	319.2	323.9
锚点主板减薄过渡区(筒外)	253.0	254.3
锚点处加厚段筒壁 B 区	215.6	217.4

4.4 锚点建造变形影响

锚点主板与两侧 V 形翼板之间夹角为 37° , V 形翼板长 1960 mm 、厚 40 mm 。建造焊接锚点主板和筒体时, V 形翼板中部产生了 19 mm 的侧向变形,超过了允许建造误差 3 mm (0.15% 构件长度) 要求。为评估此侧向变形的影响,在锚点局部细化有限元模型中,模拟出 V 形翼板中部有 20 mm 的侧向变形;百年一遇环境条件,锚缆破断工况时, V 形翼板变形对锚点强度的影响分析结果见表 9,可见 1 块 V 形翼板中部有 20 mm 的侧向变形

使其自身和锚点主板根部最大等效应力分别增大约 9% 和 14%,但仍小于许用等效应力,即不再矫正此建造变形。

表 9 V 形翼板变形对锚点强度的影响表

Tab.9 Influence of deformed V plate on strength of anchor pad eye

构件	最大等效应力 /MPa		
	V 形翼板 无变形	1 块 V 形翼板 变形 20 mm	2 块 V 形翼板 均变形 20 mm
锚点主板根部 90 mm 厚板(筒内)	221.4	252.3	222.1
V 形翼板	227.5	248.0	226.6

4.5 锚点材质及热处理

企标 IV 对铸钢的机械性能要求见表 10。低碳硅锰铸钢锚点除了机械性能要求外,还需控制材料各元素含量和碳当量,以使其焊接性能与吸力锚筒体钢材相适应。

表 10 铸钢机械性能要求表

Tab.10 Mechanical performance requirement of cast steel

最小屈服 强度 /MPa	最小极限抗 拉强度 /MPa	屈强比	最小 延伸率	最大硬度 / HB
345	500	≤0.9	22%	230

大型铸钢件通常存在枝晶偏析、组织不均匀、网状组织和晶粒粗大等问题。企标 IV 要求,铸钢件和钢材厚度超过 90 mm 时需进行热处理,使其符合力学性能要求的同时,提高硬度以改善耐磨性^[19]。本锚点铸钢件的交付状态为“淬火+回火”的调质状态,需进行 580±15℃ 的“淬火+回火”处理。吸力锚筒体钢材的交付状态为正火状态,钢材需 600±15℃ 正火处理。铸钢锚点件和吸力锚筒体钢材的热处理温度不匹配会造成锚点机械性能的下降和热处理后的锚点变形^[20]。为保证锚点结构最佳机械性能,采用的热处理工艺有以下五步。

1) 定位焊接前预热。在焊接铸钢件和吸力锚筒体前,对两种钢材预热至最低 150℃ 并缓慢降至常温。

2) 正火处理。焊接铸钢件和吸力锚筒体后,加热锚点至 935℃ 并保持 6 h,自然风冷至常温。

3) 淬火处理。加热锚点至 900℃ 并保持 3 h 后,水淬处理。

4) 回火处理。加热锚点至 580℃ 并保持 6 h 后,自然风冷至常温。

5) 应力释放热处理。加热锚点至 560℃ 并在保温毯内保持温度 10 h,在 10 h 内缓慢降温至 380℃ 后,再降至常温。锚点实际应力释放热处理工艺曲线见图 8。

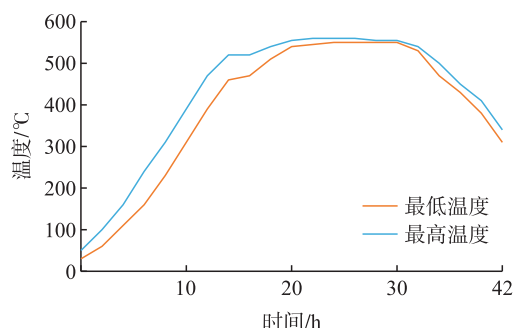


图 8 锚点实际应力释放热处理工艺曲线图

Fig.8 Curve of stress-relief heat treatment for anchor pad eye

5 结论

1) 百年一遇环境条件,2 根系泊线破断、锚缆破断和瞬态自存等工况是吸力锚及锚点结构设计控制工况;吸力锚及锚点结构应具有足够的强度冗余。

2) 吸力锚的垂直度和锚点方位角海上安装误差是吸力锚及锚点结构设计应考虑的重要影响因素;结构分析时应模拟连接器对锚点主板的杠杆效应,计入锚点处受主平面外荷载的影响。对吸力锚整体、锚点处加厚段和锚点局部结构有限元分析的应力结果差异应足够小,保证分析结果的准确性。吸力锚及锚点承载后的最大变形和建造误差应满足 API Bulletin 2U 规范对结构稳定性的要求。

3) 吸力锚筒内的 V 形翼板中部的侧向建造变形可使其自身和锚点主板根部等效应力增大;应注意矫正吸力锚结构件过大的建造变形,保证建造质量。

4) 铸钢锚点除了机械性能要求外,还需控制材料各元素含量和碳当量,以使其焊接性能与吸力锚筒体钢材相适应。为保证锚点结构最佳机械性能,应采用合理的热处理工艺。

参考文献:

- [1] 邱月,高玉峰,黎冰,等. 倾斜荷载作用下沉箱基础的极限承载力计算方法[J]. 长江科学院院报,2017,34(6):103-107.
QIU Yue, GAO Yufeng, LI Bing, et al. Calculation methods for ultimate inclined bearing capacity of caisson foundation under inclined load [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34 (6): 103-107.
- [2] 叶永彪,申辉,张伟,等. 深水管汇吸力桩基础的下放安装研究[J]. 中国造船,2021,62(4):219-229.
YE Yongbiao, SHEN Hui, ZHANG Wei, et al. Research on installation of suction anchor foundation for deep-water manifold [J]. Shipbuilding of China, 2021, 62 (4): 219-229.
- [3] 袁中立,秦延龙,唐海燕. 浅海桶形基础平台[M]. 北京:石

- 油工业出版社, 2010.
- YUAN Zhongli, QIN Yanlong, TANG Haiyan. Shallow sea suction foundation platform [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010.
- [4] 国 振. 吸力锚锚泊系统安装与服役性状研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- GUO Zhen. Performance of suction anchor mooring system during its installation and in service [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [5] American Petroleum Institute. API Recommended Practice 2SK: Recommended practice for design and analysis of station keeping systems for floating structures [S]. Houston: American Petroleum Institute, 2005.
- [6] 徐田甜, 张美荣. 深水 FPSO 船体波浪砰击载荷试验和结构分析[J]. 天然气与石油, 2022, 40(2): 118-124.
- XU Tiantian, ZHANG Meirong. Wave slamming load test and structural analysis on deep water FPSO hull [J]. Natural Gas and Oil, 2022, 40 (2): 118-124.
- [7] Bureau Veritas. Classification of mooring systems for permanent offshore units BV-NR493 [S]. Paris: Bureau Veritas, 2012.
- [8] 秦 宇. 不同断缆模式下 FPSO 瞬态运动响应评估[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- QIN Yu. Transient response evaluation of FPSO with different failure scenarios of mooring lines [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.
- [9] 中国船级社. 海上浮式装置入级规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
- China Classification Society. Rules for classification of offshore floating structures [S]. Beijing: China Communications Press, 2020.
- [10] 吴蕴州. 锚链与锚固基础相互作用研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- WU Yunzhou. The study of the interaction between anchor chain and the foundation [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [11] 周 密, 周树津, 张文耀, 等. 吸力锚基础在黏土中的贯入特性[J]. 广东海洋大学学报, 2021, 41(6): 108-117.
- ZHOU Mi, ZHOU Shujin, ZHANG Wen Yao, et al. Installation of suction caissons in non-homogeneous clay [J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2021, 41 (6): 108-117.
- [12] 张宗峰. 西非深水海底管道沉降分析[J]. 海洋工程, 2016, 34(1): 58-64.
- ZHANG Zongfeng. On-bottom settlement analysis of subsea pipeline in deep-water of West Africa [J]. The Ocean Engineering, 2016, 34 (1): 58-64.
- [13] 沈侃敏. 海洋锚泊基础安装与服役性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- SHEN Kanmin. Performance of offshore mooring systems during installation and in service [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [14] 杨玉龙. 海底吸力锚沉贯过程实时监控系统研制[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2021.
- YANG Yulong. Development of real-time monitoring system for submarine suction anchor penetration process [D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2021.
- [15] 韩智臣, 孙昭晨, 梁书秀. 饱和软黏土中吸力锚的承载能力数值分析[J]. 水运工程, 2013, (4): 162-167.
- HAN Zhichen, SUN Zhaochen, LIANG Shuxiu. Numerical analysis of bearing capacity of suction caissons in saturated soft clay [J]. Port and Waterway Engineering, 2013, (4): 162-167.
- [16] 张 苇, 杜 湧, 高建财, 等. 砂土中吸力式单桩极限抗斜拉承载力计算[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2018, 43(1): 232-239.
- ZHANG Wei, DU Yong, GAO Jiancai, et al. Calculation for ultimate inclined pull-out capacity of single suction pile in sand [J]. Journal of Guangxi University (Nature Science Edition), 2018, 43 (1): 232-239.
- [17] RANDOLPH M F, O'NEILL M P, STEWART D P, et al. Performance of suction anchors in fine-grained calcareous soils [C] // Offshore Technology Conference, 4-7 May, 1998, Houston, Texas, USA; SPE, 1998: 10.4043/8831-MS.
- [18] American Petroleum Institute. API Bulletin 2U, Bulletin on stability design of cylindrical shells [S]. Houston: API, 2004.
- [19] 王乾浩. 锚链考虑腐蚀磨损的疲劳及极限强度演变研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- WANG Qianhao. Study on fatigue and ultimate strength evolution of anchor chain considering corrosion wear [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [20] 陆传航, 耿建成, 颜克柯, 等. 吸力锚用高强铸钢焊接工艺[J]. 焊接技术, 2020, 49(9): 43-45.
- LU Chuanhang, GENG Jiancheng, YAN Keke, et al. Welding process of high strength cast steel for suction anchor [J]. Welding Technology, 2020, 49 (9): 43-45.