

文章编号:1673-5005(2012)01-0117-05

深水钻井隔水管单根基本参数确定方法

畅元江¹, 鞠少栋¹, 陈国明¹, 许亮斌², 殷志明², 赵立红³

(1. 中国石油大学 海洋油气装备与安全技术研发中心, 山东 青岛 266555; 2. 中海油研究总院, 北京 100027;
3. 山东泰安煤矿机械有限公司, 山东 泰安 271000)

摘要:提出利用各种力学准则确定深水钻井隔水管单根基本参数的方法,包括单根主管与辅助管线参数、浮力块参数、隔水管接头参数等。结果表明:确定隔水管单根主管基本尺寸主要有环向应力准则、轴向应力准则和挤毁压力准则,根据环向应力准则得到的结果最保守;确定辅助管线参数主要依据等效应力准则;确定浮力块参数主要是合理确定浮力块的外径和密度;隔水管接头等级确定要依据规范考虑不同载荷工况进行选型设计。外径0.5334 m,内径0.48895 m的隔水管可应用于1.830 km深的水域,且隔水管系统中无须配置填充阀,辅助管线设计合理,浮力块选用3种密度可满足工作水深的需要,选配E级隔水管接头可满足使用要求。

关键词:深水钻井;隔水管;基本参数;确定方法;接头

中图分类号:TE 95 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1673-5005.2012.01.020

Determining methods for basic parameters of deepwater drilling riser single

CHANG Yuan-jiang¹, JU Shao-dong¹, CHEN Guo-ming¹, XU Liang-bin², YIN Zhi-ming², ZHAO Li-hong³

(1. Center for Offshore Engineering & Safety Technology, China University of Petroleum, Qingdao 266555, China;
2. Research Institute of China Offshore Oil, Beijing 100027, China;
3. Shandong Taian Coal Mining Machinery Group CO, Ltd, Taian 271000, China)

Abstract: A method for determining the basic parameters of deepwater drilling riser single was proposed, which includes determination method of parameters for main pipe and auxiliary lines, buoyancy modules, and classification of the riser connector. The results show that the circumstantial stress, axial stress and collapse pressure criterion can all be used to determine the dimension of the main pipe. However, the results based on the circumstantial stress criterion are more conservative, and equivalent stress criterion can be used to determine the parameters of the peripheral lines of the joint. Depending on water depth, the outside diameter and density of the buoyancy modules should be determined reasonably, and the classification of the riser connector should be checked in different load cases according to API codes. The riser joints with the outside diameter of 0.5334 m and inside diameter of 0.48895 m can be operated in water depth of 1.830 km, and the fill valve is not necessary to the riser system. The design of peripheral lines and riser clamps meets the requirement of strength and stability. Three kinds of buoyancy modules meet the needs to the water depth, and matching E-class riser connector meets the requirements.

Key words: deepwater drilling; riser; basic parameters; determination methods; joint

钻井隔水管系统是浮式海洋钻井平台上进行钻井的重要装备^[1]。自钻台到海底,典型的深水钻井隔水管系统包括卡盘/万向节、分流器、上部挠性接头、隔水管短节、伸缩节、填充阀、隔水管单根(包括节流与压井管线、水力管线、泥浆增压管线、浮力块)、终端短节、底部隔水管总成(包括下部挠性接

头)、井口防喷器等^[2]。隔水管单根是隔水管系统的主体,其基本构成包括主管、辅助管线、接头以及浮力块等。为满足不同需要,隔水管制造商提供的隔水管外径一般有0.4064(16")、0.4731(18 5/8")、0.5334(21")和0.6096 m(24") ,其中0.5334 m外径的隔水管单根最为通用;隔水管单根壁厚尺寸

收稿日期:2011-09-02

基金项目:国家自然科学基金项目(50904078);国家“863”高技术研究发展计划项目(2008AA09A106)

作者简介:畅元江(1974-),男(汉族),河南洛阳人,副教授,博士,主要研究方向为深水钻井技术与装备、计算机辅助工程与仿真技术等。

主要有 12.7、15.9、17.5、19.1、25.4 和 31.8 mm; 隔水管接头额定载荷从 A 至 H 共 7 个等级, 可根据需要选配; 隔水管浮力块由复合泡沫塑料生产商供应, 浮力块外径可在 0.9144 ~ 1.397 m 进行选择 and 配置设计^[3]。确定钻井隔水管的基本参数就是要根据所在海域的海洋环境条件, 结合钻井参数如最大钻井液密度等, 并根据钻井平台的具体情况, 给出合理的隔水管系统设计, 包括隔水管单根基本参数和浮力块整体和局部设计参数, 隔水管接头等级等。目前, 隔水管系统设计与应用技术均被外国垄断, 对于隔水管系统总体分析与设计的文献较多^[4,5], 也有研究隔水管基本力学问题的文献^[6], 但关于螺栓法兰型隔水管单根基本参数确定方法一直未见文献报道^[7]。笔者研究该类隔水管基本参数确定方法, 包括单根主管与辅助管线基本参数、浮力块参数、隔水管接头等级等, 并通过算例给出相关方法的应用。

1 钻井隔水管单根主管参数确定方法

确定隔水管单根主管壁厚主要有环向应力准则、轴向应力准则(顶部张紧力准则)和挤毁压力准则, 设计时最终选用的隔水管单根壁厚需要同时满足 3 种应力准则。

1.1 环向应力准则

隔水管在内、外压作用下产生的环向应力为

$$\sigma_h = [(p_i - p_o)(D/(2t))] - p_i \quad (1)$$

对式(1)进行变形, 得到隔水管单根最小壁厚为

$$t = \frac{D(p_i - p_o)}{2(\sigma_h + p_i)} \quad (2)$$

式中, p_i 为钻井液压力, Pa; p_o 为海水静水压力, Pa; D 为管外径, m; t 为壁厚, m; σ_h 为环向应力, Pa。

校核准则为计算得到的隔水管环向应力小于材料的许用应力。

1.2 轴向应力准则(顶部张紧力准则)

隔水管在某截面处承受的由于轴向载荷所引起的轴向应力^[8]为

$$\sigma_a = T/A, \quad (3)$$

其中

$$T = T_{top} - W_r, \quad W_r = W_p + W_a + W_f - F_b$$

式中, σ_a 为轴向应力, Pa; T 为某截面处的张力, N; A 为隔水管的横截面积, m^2 ; T_{top} 为隔水管承受的顶张力(由张紧器产生), N; W_r 为隔水管自顶端至临界截面的湿重, N; W_p 为临界截面之上的隔水管主管湿重, N; W_a 为临界截面之上的辅助管线(如节流与

压井管线)湿重, N; W_f 为临界截面之上的内部钻井液湿重, N; F_b 为临界截面之上的浮力块净浮力, N。

隔水管顶部轴向应力为顶部张紧力与隔水管横截面积之比:

$$\sigma_{top} = T_{top}/A. \quad (4)$$

1.3 挤毁压力准则

隔水管挤毁由外部静水压力引起, 由于隔水管具有小的壁厚/半径值和大的长度/直径值, 隔水管挤毁被隔水管弹性屈曲所控制。挤毁压力的计算公式^[9]为

$$p_c = c_m c_g \frac{2E}{(1-\gamma^2)} \left(\frac{t}{D}\right)^3 \quad (5)$$

式中, p_c 为隔水管最小挤毁压力, Pa; c_m 为载荷与材料不确定系数(0.85); c_g 为几何缺陷系数(0.88); E 为弹性模量, Pa; γ 为材料泊松比(0.3)。

变形得到的基于挤毁压力的隔水管单根最小壁厚为

$$t = [p_c(1-\gamma^2)D^3/(2c_m c_g E)]^{1/3} \quad (6)$$

采用方程(6), 可计算得到外径 0.508 m、壁厚 12.7 mm 的隔水管单根的挤毁压力为 4.5929 MPa, 等效为大约 457.2 m 水深(海水压力为 4.592574 MPa), 此即隔水管在海平面下方 487.68 ~ 518.16 m 发生挤毁的原因。

不同外径、不同壁厚的隔水管临界挤毁水深如图 1 所示。临界压力采用等效海水深度表示。由图 1 可知, 临界水深对于隔水管壁厚非常敏感, 壁厚从 12.7 mm 增加到 15.9 mm 将导致 0.508 m 外径隔水管挤毁水深增加到 914.4 m。目前使用的很多隔水管的挤毁压力都处于开发的安全水深范围之内, 例如外径为 0.4731 m, 壁厚为 15.9 mm 的隔水管单根的临界水深大约为 1219.2 m。如果该隔水管应用于作业水深小于 1219.2 m 的水域, 则隔水管系统不必配置填充阀。

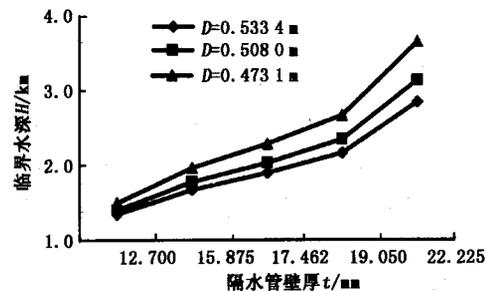


图 1 隔水管挤毁临界水深与隔水管壁厚关系
Fig. 1 Relationship between critical collapse depth and wall thickness of riser joint

2 钻井隔水管单根辅助管线参数确定方法

辅助管线相对于主管来说,不属于典型的薄壁结构,内外静液压力作用下其径向应力 σ_r 和环向应力 σ_θ 分别为

$$\sigma_r = -\left(\frac{b^2}{r^2}-1\right)p_1/\left(\frac{b^2}{a^2}-1\right) - \left(1-\frac{a^2}{r^2}\right)p_E/\left(1-\frac{a^2}{b^2}\right),$$

$$\sigma_\theta = -\left(\frac{b^2}{r^2}+1\right)p_1/\left(\frac{b^2}{a^2}-1\right) - \left(1+\frac{a^2}{r^2}\right)p_E/\left(1-\frac{a^2}{b^2}\right). \quad (7)$$

式中, a 和 b 分别为辅助管线的内、外半径, m; p_E 和 p_1 分别为内、外静水压力, Pa; r 为径向距辅助管线轴心的距离, m。

由于辅助管线公端可沿轴向自由滑动,其轴向应力仅有摩擦力产生,可忽略不计。采用式(7)计算得到辅助管线径向应力和环向应力之后,可根据有关强度理论进行强度分析。

另外,从结构设计角度考虑,螺栓法兰型钻井隔水管的辅助管线接头采用插入式连接,即辅助管线一端固定,另一端可以自由滑动。这种设计方案引起隔水管辅助管线抗弯刚度与主管差异较大,为防止辅助管线可能的屈曲失稳,辅助管线应通过隔水管夹与主管约束在一起。隔水管夹的间距确定可应用欧拉公式求取屈曲长度,只要隔水管夹间距小于临界屈曲长度即可,其间距一般约为 2.13 m,但考虑到浮力块对辅助管线的辅助支撑作用以及成本原因,设计时其间距一般取 3.66 m^[10]。

3 隔水管单根浮力块参数确定方法

钻井隔水管单根浮力块设计参数主要包括浮力块外径和复合泡沫塑料的密度。

3.1 浮力块外径

随着水深的增加,为了能够尽可能补偿隔水管的湿重,浮力块的直径越来越大。浮力块的设计与配置需考虑的因素包括隔水管系统的整体质量补偿比例、隔水管接头等级以及钻井船转盘尺寸。隔水管系统的整体质量补偿比例依赖于隔水管系统的风暴悬挂模式,需要进行软、硬悬挂模式下系统轴向动力学分析以确定其精确值;浮力块外径较小且分布式配置可减小隔水管接头载荷,若浮力块外径较大且间隔配置将增加接头的局部载荷,这在深水钻井隔水管系统设计时需予以额外考虑。

3.2 浮力块密度

由于复合泡沫塑料的强度正比于其密度,浮力

块安全系数常用 C/P 比例(挤毁压力与服役压力的比例)来表示,它是标定复合泡沫塑料的最重要的因素,更高的安全系数导致浮力块密度和质量增加。典型复合泡沫塑料标定深度做法如表 1 所示。

表 1 典型复合泡沫塑料标定深度方法

Table 1 Typical calibration depth method for composite foam depth

安全系数	应用本质
C/P	
1.00 ~ 1.25	不重要/短期:价格低廉或者可消耗仪器,一次性使用
1.25 ~ 1.50	一般应用:无人潜水器,ROV,隔水管等
1.50 ~ 2.00	重要/长期应用:载人潜水器,采油管等

对于深水钻井隔水管来说, C/P 的值可取 1.25 ~ 1.50。譬如,服役水深为 914.4 m 的浮力块应当采用挤毁强度不小于 12.24 MPa 的复合泡沫塑料,对应于泡沫材料密度为 400.82 ~ 448.92 kg/m³。但是需要注意,在 914.4 m 水深,密度为 416.85 kg/m³ 的泡沫塑料吸收海水的速度是密度为 448.92 kg/m³ 的 3 倍。故设计浮力块参数还须考虑材料的长期吸水性能。

4 隔水管接头等级确定方法

API 规范基于接头的抗张力能力建立隔水管接头选型级别^[11]。为满足某一额定载荷要求,接头的应力不应该超过接头材料的许用应力极限。API 隔水管接头级别为 A、B、C、D、E、F、H 时,抗拉张力 T 分别为 2.225、4.449、5.562、6.674、8.898、11.123 和 15.572 MN。

螺栓法兰型隔水管接头分析须考虑接头额定载荷、工作载荷、悬挂载荷和螺栓预紧载荷。额定载荷基于隔水管接头级别确定;工作载荷包括隔水管轴向张力和弯矩;悬挂载荷为悬挂状态下隔水管顶部受到钻井船升沉运动激励而发生轴向振动,钻井船升沉运动与悬挂管柱耦合导致隔水管顶部接头出现的极值载荷;预紧载荷由隔水管公母接头之间进行连接的螺栓预紧力产生。

对每个级别的隔水管接头还必须评估 6 个应力:整体一次薄膜应力 S_{pm} 、局部薄膜应力 S_{lm} 、一次弯曲应力 S_{pb} 、二次应力 S_{se} 、纯剪切应力 S_{sh} 以及承压应力 S_{bs} 等。隔水管接头中除螺栓外的所有接头部件都应该满足:

$$S_{pm} \leq 0.667S_y, S_{lm} + S_{pb} \leq S_y, S_{lm} + S_{pb} + S_{se} \leq 2S_y, S_{sh} \leq 0.4S_y, S_{bs} \leq S_y.$$

对于隔水管接头,6 种应力的许用应力按单个应力种类和组合应力种类给出,它们均为材料屈服

强度 S_y 的函数。

5 算例

5.1 基本参数

隔水管单根中主管外径为 0.533 4 m, 内径为 0.488 95 m, 长度为 22.86 m, 所用材料为 X80 钢, 屈服强度为 552 MPa, 许用应力为 368 MPa; 隔水管接头法兰所用材料为 30CrMo, 屈服强度为 552 MPa, 许用应力为 368 MPa; 辅助管线所用材料为 X65 钢, 屈服强度为 448 MPa, 许用应力为 299 MPa。3 种材料的泊松比为 0.3, 弹性模量为 210 GPa, 强度校核时安全系数均取为 1.5。钻井液最大密度为 2 040 kg/m³。隔水管单根几何尺寸如表 2 所示。要求确定该隔水管单根能否应用于 1 830 m 水深。

表 2 隔水管单根几何尺寸

Table 2 Dimensions of riser single

名称	数量	外径 D /mm	内径 d /mm	长度 L /m	工作压力 p /MPa
节流管线	1	171.45	114.30	22.86	103.4
压井管线	1	171.45	114.30	22.86	103.4
泥浆增压线	1	127.00	101.60	22.86	34.5
液压管线	2	107.95	88.90	22.86	34.5
接头	1	946.15	488.95	1.06	

5.2 计算结果

基于环向应力准则计算得到环向应力为 180 MPa, 小于材料的许用应力; 由于 1 830 m 水深隔水管张紧器提供的张力为 515 t, 基于顶部张紧力准则计算得到的轴向应力为 141 MPa, 小于材料的许用应力; 根据隔水管挤毁压力准则计算得到隔水管挤毁压力为 25 MPa, 等效为海平面以下 2 489 m 处发生挤毁, 于是 1 830 m 水深隔水管系统不需要配置填充阀, 故隔水管单根主管设计满足要求。

隔水管辅助管线受力情况见表 3。由表 3 可知, 隔水管辅助管线满足强度要求, 可在设计条件下安全可靠工作。

表 3 隔水管辅助管线强度校核结果

Table 3 Strength check results of auxiliary lines of riser

名称	径向应力 σ_h /MPa	环向应力 σ_x /MPa	等效应力 σ /MPa
节流/压井管线	103.4	268.8	234.8
泥浆增压线	34.5	157.2	143.1
液压管线	34.5	179.9	165.4

隔水管可配置 3 种标定不同服役水深的浮力块, 分别应用于海平面下方 0~914.4 m、914.4~1 828.8 m 和 1 828.8~2 286 m, 外径均为 1.209 6 m, 密度分别为 410.12、512.73 和 560.03 kg/m³。浮力块的表

观质量分别为 12.416、10.291、9.311 t, 由于隔水管单根湿重为 12.831 t, 于是单根质量补偿比例分别为 96.76%、80.2% 和 72.56%。计算表明, 就整个系统来说, 隔水管系统的总浮力为 1 626.4 t, 总干重为 1 893.1 t, 由此可得到系统的总体浮力系数约为 86%。

E 级接头法兰等效力分布如图 2、3 所示。单根公端和母端接头法兰最大等效力位置均发生在与主管连接处, 分别为 196.2 MPa 和 156.2 MPa, 小于材料许用应力。螺栓法兰型接头在 1.2 倍和 1.4 倍螺栓预紧载荷作用下, 分别在额定载荷、工作载荷和悬挂载荷工况下, 隔水管接头与螺栓强度均满足要求。另据计算, 该接头在额定载荷作用下, 隔水管接头整体一次薄膜应力 S_{pm} 、局部薄膜应力与一次弯曲应力以及二次应力的和 $S_{lm} + S_{pb} + S_s$ 、纯剪切应力 S_{sh} 、承压应力 S_{bs} 分别为 259、383、127 和 354 MPa, 计算结果均满足规范要求, 表明隔水管接头设计合理。

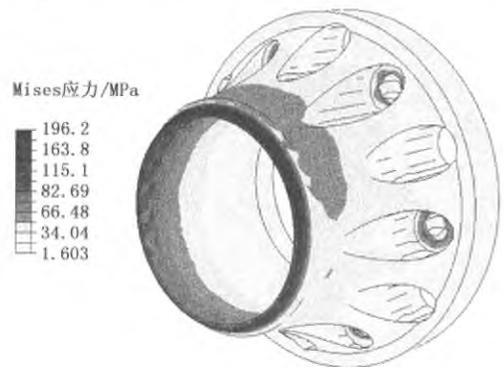


图 2 隔水管公接头法兰 Mises 应力分布

Fig. 2 Distribution of Mises stress for pin end flange of riser connector

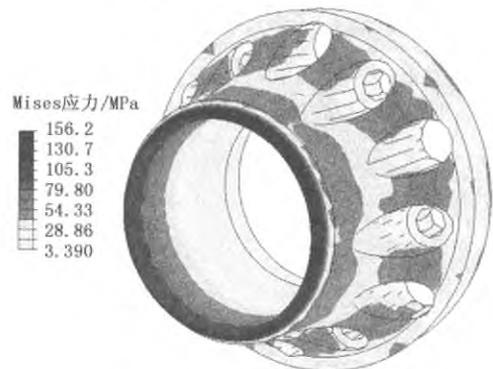


图 3 隔水管母接头法兰 Mises 应力分布

Fig. 3 Distribution of Mises stress for box end flange of riser connector

6 结 论

(1) 确定隔水管单根主管壁厚主要有环向应力准则、轴向应力准则和挤毁压力准则,根据环向应力准则得到的结果最保守;确定辅助管线参数主要依据等效应力准则;确定浮力块参数主要是合理确定浮力块的外径和密度;隔水管接头等级要考虑不同载荷工况进行选型确定。

(2) 外径 0.5334 m, 内径 0.48895 m 的隔水管可应用于 1830 m 的水域,且隔水管系统中无须配置填充阀,辅助管线设计合理,浮力块选用 3 种密度可满足工作水深的需要,选配 E 级隔水管接头可满足使用要求。

参考文献:

- [1] 畅元江,陈国明,孙友义,等.深水钻井隔水管的准静态非线性分析[J].中国石油大学学报:自然科学版,2008,32(3):114-118.
CHANG Yuan-jiang, CHEN Guo-ming, SUN You-yi, et al. Quasi-static nonlinear analysis of deepwater drilling risers[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008, 32(3):114-118.
- [2] HUGH McCrae. Marine riser systems and subsea blowout preventers [M]. Austin: University of Texas Press, 2003.
- [3] 畅元江,陈国明,许亮斌,等.超深水钻井隔水管系统设计影响因素分析[J].石油勘探与开发,2009,36(4):523-528.
CHANG Yuan-jiang, CHEN Guo-ming, XU Liang-bin, et al. Influential factors for the design of ultra-deepwater drilling risers [J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(4):523-528.
- [4] 畅元江,陈国明,许亮斌.导向架隔水管在波流联合作用下的非线性动力响应[J].中国石油大学学报:自然科学版,2006,30(5):74-77.
CHANG Yuan-jiang, CHEN Guo-ming, XU Liang-bin. Non-linear dynamic response induced by wave-current for marine risers with guide-frames [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2006, 30(5):74-77.
- [5] GUESNON J, GAILLARD Ch, RICHARD F. Ultra deep water drilling riser design and relative technology [J]. Oil & Gas Science and Technology, 2002, 57(1):39-57.
- [6] CHARLES P Sparks. Fundamentals of marine riser mechanics: basic principles and simplified analyses [M]. Tulsa: Pennwell Corp, 2007.
- [7] 畅元江.深水钻井隔水管设计方法及其应用研究[D].东营:中国石油大学机电工程学院,2008.
CHANG Yuan-jiang. Design methods and its application of deepwater drilling risers [D]. Dongying: College of Electromechanical Engineering in China University of Petroleum, 2008.
- [8] 畅元江,陈国明,许亮斌,等.深水顶部张紧钻井隔水管非线性静力分析[J].中国海上油气,2007,19(3):203-207.
CHANG Yuan-jiang, CHEN Guo-ming, XU Liang-bin, et al. Nonlinear static analysis of top tensioned drilling riser in deepwater [J]. China Offshore Oil and Gas, 2007, 19(3):203-207.
- [9] ERB P R, MA T C, STOCKINGER M P. Riser collapse—a unique problem in deep-water drilling [R]. SPE 11394, 1983.
- [10] GUESNON Jean. GAILLARD Christian. Method for dimensioning a riser element with integrated auxiliary lines; US, 6991038 [P]. 2006-01-31.
- [11] American Petroleum Institute. API RP 16R—1997 Specification for marine drilling riser couplings [S]. Washington: American Petroleum Institute, 1997.
(编辑 沈玉英)
-
- (上接第 116 页)
- [12] MICHAEL T Rosenstein, JAMES J Collins, CARLO J De Luca. A practical method for calculating largest Lyapunov exponents from small data sets [J]. Physical D, 1993, 65:117-134.
- [13] THEILER J, EUBANK S, LONGTIN A, et al. Testing for nonlinearity in time series: the method of surrogate data [J]. Physica D, 1992, 58:77-94.
- [14] MIN Lei, WANG Zhi-zhong, FENG Zheng-jin. Detecting nonlinearity of action surface EMG signal [J]. Physics Letters A, 2001, 290:297-303.
- [15] ROMBOUTS S, KEUNEN R. Investigation of nonlinear structure in multichannel EEG [J]. Phys Lett A, 1995, 202:352-358.
(编辑 沈玉英)