

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2017.07.003

深海石油钻采隔水管浮力材料的制备及其强度分析

周云^a, 易强^b, 王莉萍^a, 王东胜^a, 尹衍升^a, 董丽华^a

(上海海事大学 a.海洋科学与工程学院; b.物流工程学院, 上海 201306)

摘要: 隔水管系统是海洋石油钻采的重要技术装备, 而浮力块是深水条件下钻井隔水管系统的必备部件。笔者使用碳纤维增强聚合物中空球, 与环氧树脂、空心玻璃微珠以适当比例混合, 采用真空浇注工艺制备3组分隔水管浮力材料, 并采用有限元软件 ANSYS 对浮力块在不同的工况下进行强度分析。研究表明, 浮力材料密度为 500 kg/m^3 , 压缩强度为 60 MPa; 浮力块最大变形发生在其自由端, 其值为 4.08 mm; 最大应力发生在与隔水管相邻的结构上, 其值为 50.02 MPa。最大变形值和应力值均很小, 所制备的隔水管浮力块强度满足 3 000 m 水深以内钻采作业要求。

关键词: 隔水管系统; 浮力材料; 浇注成型; 强度分析; 有限元

中图分类号: TE52

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2017)07-019-06

Preparation and strength analysis of buoyancy materials for deep-sea drilling riser

ZHOU Yun^a, YI Qiang^b, WANG Liping^a, WANG Dongsheng^a, YIN Yansheng^a, DONG Lihua^a

(a.College of Ocean Science and Engineering; b.Logistics Engineering College, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, P.R.China)

Abstract: Drilling riser system is a critical component of marine oil drilling, and buoyancy module is essential for deep-sea drilling riser system. In this paper, three phase epoxy buoyancy materials filled with carbon fiber reinforced hollow macrospheres and hollow glass microspheres was prepared by vacuum pour molding. Strength analysis has been conducted on the buoyancy modules with different load conditions by using ANSYS. The results show that the density of buoyancy material is 500 kg/m^3 and the compressive strength is 60 MPa. The maximum deformation of buoyancy modules occurs in the free end with a value of 4.08 mm. The maximum stress occurs on the structure adjacent to riser with a value of 50.02 MPa, which makes the prepared buoyancy modules meet the drilling requirements of 3 000 m water depth.

Keywords: riser system; buoyancy material; pour molding; strength analysis; finite element

随着海洋石油资源的开发竞争进入到深海领域, 海洋石油钻采技术与装备的发展显得非常重要。钻井隔水管系统是海洋石油钻采的重要技术装备, 而浮力块是深水条件下钻井隔水管系统的必备部件。钻井隔水管是连接海底和钻井平台的管道, 其重量大, 工况复杂恶劣, 为保证平台安全, 必须在隔水管外安装浮力块来减轻隔水管系统的重量。随着海水深度的增加, 隔水管系统的受力状况更加复杂和恶劣^[1], 对于研制满足

收稿日期: 2017-02-21

基金项目: 国家海洋局公益行业科研专项资助项目(20140513-2)。

Supported by Special Fund of State Oceanic Administration, People's Republic of China for Scientific Research in the Public Interest(20140513-27)。

作者简介: 周云(1981-), 男, 上海海事大学博士研究生, 主要从事船舶与海洋工程材料研究, (E-mail) yunzhou@shmtu.edu.cn。

深海条件的浮力材料是十分必要的。笔者概述了一种高强度低密度三组分浮力材料的制备方法,并基于 ANSYS Workbench 软件,对深海环境下的浮力块进行强度计算^[2-3]。

1 隔水管浮力材料的制备及表征

1.1 浮力材料的制备

制备固体浮力材料的方法主要是复合泡沫浮力材料法以及合成复合泡沫浮力材料法。固体浮力材料的基体一般都为环氧树脂,并加以空心玻璃微珠作为轻质填充材料^[4]。笔者使用碳纤维增强聚合物中空球,与环氧树脂、空心玻璃微珠以适当比例混合,配方如表 1 所示,采用真空浇注工艺制备三组分固体浮力材料^[5],其制备流程如图 1 所示。

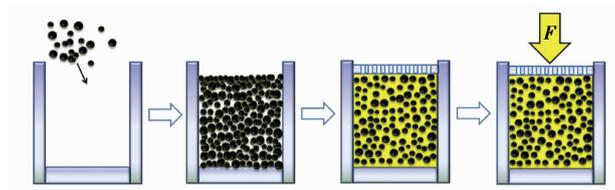


图 1 三组分固体浮力材料制备流程示意图

Fig.1 The preparation flow chart of three phase epoxy buoyancy materials

首先,将碳纤维增强聚合物中空球加入模具;然后,将称量好的环氧树脂、固化剂、空心玻璃微珠混合均匀,置于脱泡搅拌机中以 2 000 r/min 的速度搅拌 6 min,在真空状态下倒入模具进行浇注;浇注完成后,在 0.1 MPa 压力条件和 80 °C 温度条件下预固化 2 h,再以 120 °C 的温度后固化 3 h,最后脱模,即得三组分固体浮力材料胚材。

为了进一步提高深海石油钻采隔水管浮力块的强度和耐腐蚀性能,降低其吸水率,采用手糊成型工艺,在浮力材料胚材表面制备一层玻璃钢蒙皮,并喷涂特种海洋油漆,该特种油漆包括底漆、氟碳面漆和氟碳罩光漆,所制得的三组分隔水管浮力块如图 2 所示。

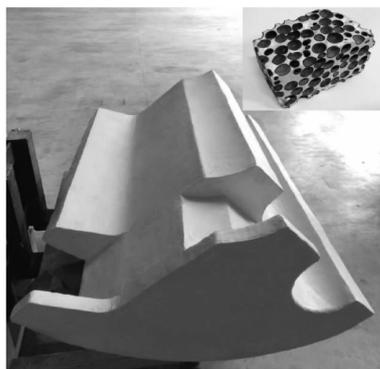


图 2 隔水管浮力块及其内部图

Fig.2 The buoyancy material and its inner structure

通过调节碳纤维增强聚合物中空球与玻璃微珠的添加量,可以制备出一系列密度和强度的三组分固体浮力材料,系列浮力材料的密度和强度形成梯度,适用于不同海深条件下,海洋石油钻采对浮力块性能的要求。

1.2 浮力材料性能表征

按照美国军标 MIL-S-24154A 的规定制备标准试样,并参照相关国家标准对浮力材料关键性能参数进行表征^[6],测得数据如表 2 所示。

表 1 主要原材料配方

Table 1 Main materials

主要原材料	质量份数
环氧树脂	100
固化剂	34
空心玻璃微珠	33
聚合物中空球	83

注:表中配方表示树脂质量为 100 份,其他原料为树脂质量百分数

表2 浮力材料性能参数

Table 2 Performance parameters of the buoyancy material

主要原材料	数据值	检测标准
弹性模量	2.2 GPa	GB/T 2567—2008
泊松比	0.38	GB/T 2567—2008
压缩强度	60 MPa	GB/T 2567—2008
密度	500 kg/m ³	GB/T 4472—2011

2 隔水管浮力块的强度分析

2.1 概述

浮力块通常安装在深海石油钻采隔水管的外部,静水压力是影响浮力块工作性能的最重要参数。强度不达标的浮力块在大深度水下会发生吸水、变形、甚至破坏等,不利于保持浮力的变化,这些变化使得浮力块失去承载功能,甚至成为负担,其后果不堪设想,严重的将造成生命危险和巨大财产损失。因此,在浮力块设计和制备过程中,必须根据隔水管系统使用的深度和所承受的静水压力,确保采用的浮力块具备足够的强度和刚度,使其在深海作业过程中受到的静水压力在浮力材料能承受的静水压力范围之内,而不影响所配重的隔水管系统稳定正常工作^[7]。文中计算了深海石油钻井平台隔水管浮力块在4种典型的作业水深工况下的强度,利用有限元软件 ANSYS 对浮力块进行有限元建模,对模型施加边界条件和载荷,求解最大应力和最大变形,以验证所制备的浮力块是否满足深水作业的强度要求。

2.2 有限元模型建立

1根隔水管通常分为4节,每节长5 248 mm,形式和材质相同,因此,在计算隔水管浮力块强度时只需取1节进行计算,并可简化模型。隔水管浮力块有限元模型采用 SOLID186 单元模拟,最小面单元尺寸大约为50 mm,如图3所示。

2.3 边界条件

隔水管浮力块依附于直径为539.8 mm的隔水套管,因此,在计算隔水管浮力块强度时,可简化为由隔水套管提供约束,即隔水套管提供固定约束^[8],如图4所示。

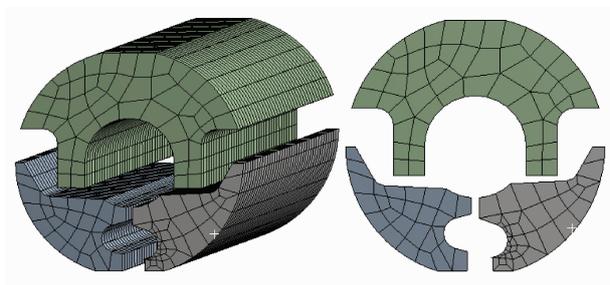


图3 隔水管浮力块有限元模型及其横剖图

Fig.3 The FEM model of the buoyancy material and its cross-section

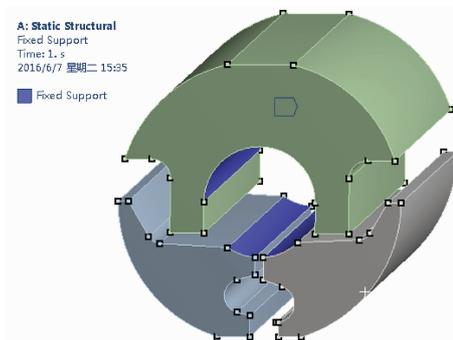


图4 隔水管浮力块边界条件

Fig.4 The boundary conditions of the buoyancy material

对于3 000 m水深的半潜式钻井平台或钻井船,隔水管厂商诸如 Aker Subsea、Cameron 等著名公司,通常将隔水管浮力块的作业水深定义为3种,即水深分别为762、1 524、2 286 m。目前,海工装备钻井水深最深约为3 000 m^[9]。这里分别对762、1 524、2 286、3 000 m 4种水深工况下隔水管浮力块强度进行分析。隔水管浮力块除承受自身重力和浮力外,还受到钻井平台或钻井船本身运动加速度的影响^[10-11],参照服务于南海多型深水钻井平台的设计数据,取横向加速度0.69 m/s²,纵向加速度0.67 m/s²^[12]。波浪载荷对浮力块的

影响通常很小^[13],这里不予考虑,对于内波流,由于监测数据不足,难以进行科学的数值模拟,亦不作考虑。

由于作业水深的不同,浮力块所受到的静水压力不同,静水压力计算公式如式(1)所示:

$$P_h = \rho_w g h, \quad (1)$$

式中: ρ_w 为海水密度; g 为重力加速度; h 为作业水深。

浮力块受到水流力作用,计算式为式(2):

$$F = \frac{1}{2} C_D \rho_w v^2 A, \quad (2)$$

式中: C_D 为拖拽力系数; ρ_w 为海水密度; v 为海流速度; A 为构件在与流速垂直平面上的投影面积。

根据已有研究确定海水流速^[14-15],海流分别取一年一遇的涡流与一年一遇的底部流叠加所得的流、十年一遇涡流与一年一遇的底部流叠加所得的流、百年一遇涡流与一年一遇的底部流叠加所得的流,流速数据如表3所示。

表3 流速数据

Table 3 Flow speed data

水深/m	流速/(m·s ⁻¹)		
	百年一遇涡流+ 一年一遇底部流	十年一遇涡流+ 一年一遇底部流	一年一遇涡流+ 一年一遇底部流
0	2.25	1.66	1.25
100	2.12	1.56	1.18
200	1.35	1.16	0.75
300	0.63	0.46	0.35
400	0.52	0.38	0.29
500	0.41	0.30	0.23
600	0.27	0.25	0.20
800	0.41	0.41	0.41
1 000	0.54	0.54	0.54
1 200	0.64	0.64	0.64
1 400	0.73	0.73	0.73
1 600	0.90	0.90	0.90
1 800	0.90	0.90	0.90
2 000	0.90	0.90	0.90
3 048	0.90	0.90	0.90

注:水动力系数:参照规范取 $C_D=1$ ^[13]。

由表3可知,在隔水管浮力块4个考虑的作业水深中2 286 m与3 000 m两处流速最大,都为0.90 m/s,流力也最大。由于水深越深水压也越大,而深水作业情况下,水压会成为作用在隔水管浮力块结构的主要载荷,因此,只在3 000 m水深的工况计算流载荷的作用,并分别考虑两种流力方向。

隔水管浮力块所受载荷为静水压力、海流力、钻井平台(船)引起的惯性力的叠加。隔水管浮力块计算工况及所受载荷如表4所示。

表 4 计算工况载荷

Table 4 The load of design condition

工况名称	作业水深/m	横向加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	纵向加速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)	流力方向
A ₁	762	0.69	0.67	—
A ₂	1524	0.69	0.67	—
A ₃	2286	0.69	0.67	—
A ₄	3000	0.69	0.67	0°
A ₅	3000	0.69	0.67	180°

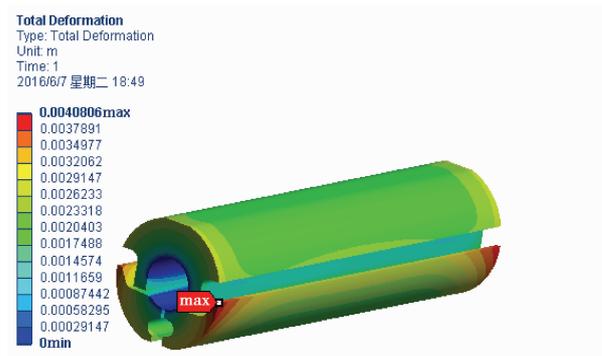
2.4 计算结果

根据第一次计算的结果,不断细化最大应力位置处的网格,再进行求解,使计算结果更加准确。图 5 为工况 A₅应力云图,图 6 为工况 A₅位移云图。表 5 总结了各种工况下隔水管浮力块最大应力值和最大变形值。从表中可见其应力值满足许用值。因此,浮力块结构满足 3 000 m 水深以内的作业。

表 5 计算结果

Table 5 Calculation results

工况	最大应力/MPa	最大变形/mm
A ₁	12.82	1.05
A ₂	25.49	2.08
A ₃	36.73	2.99
A ₄	50.02	4.08
A ₅	50.02	4.08

图 5 A₅应力云图Fig.5 A₅ cloud picture of stress图 6 A₅位移云图Fig.6 A₅ cloud picture of displacement

3 结 论

1)把碳纤维增强聚合物中空球引入固体浮力材料体系,采用这种厘米级粒径中空球作为新型轻质填料,减小对传统进口空心玻璃微珠的依赖度。不再单纯通过调节玻璃微珠的含量和型号来调节浮力材料的密度,而是通过大粒径中空球与玻璃微珠的复配,在有效降低浮力材料密度的前提下,进一步提高强度,降低成本。同时,采用真空浇注成型工艺制备三组分浮力材料,材料密度低、强度高、吸水率小。

2)浮力块的设计和制备必须根据隔水管系统使用的深度和载荷,确保浮力块具备足够的强度和刚度,在规定的使用深度内浮力保持稳定,而不发生吸水、变形、甚至破坏等不利于保持浮力的变化。隔水管浮力块在 4 种典型作业工况下的强度分析表明,静水压力是作用在浮力块上的主要载荷,随着水深的增加,最大应力和最大变形都随之增大,最大变形发生在浮力块的自由端,最大应力发生在与隔水套管相邻的结构上。最

大变形为 4.08 mm,最大应力为 50.02 MPa,两者均很小,隔水管浮力块满足强度要求,可在 3 000 m 水深以内钻采作业。

参考文献:

- [1] Frank L, Scott G. Riser solutions for ultra-deep water developments[C]// 10th India Oil & Gas Review Symposium, Mumbai;[s.n.], 2003.
- [2] Li H Y, Zhu F F, Chen Y Y. Preparation and properties of solid buoyancy materials for deep sea with newunsaturated polyesters as matrix[J]. Key Engineering Materials, 2016, 705:57-62.
- [3] 潘顺龙, 张敬杰, 宋广智. 深潜用空心玻璃微珠和固体材料的研制及其研究现状[J]. 热带海洋学报, 2009, 28(4): 17-21.
PAN Shunlong, ZHANG Jingjie, SONG Guangzhi. Research progress of hollow glass microsphere and solid buoyant material for deep-sea application[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2009, 28(4): 17-21. (in Chinese)
- [4] 周金磊, 戴金辉, 吴平伟, 等. 环氧树脂基固体浮力材料的制备及性能研究[J]. 材料开发与应用, 2013, 28(2): 59-65.
ZHOU Jinlei, DAI Jinhui, WU Pingwei, et al. Research on preparation and properties of solid buoyancy materials based on epoxy resins[J]. Development and Application of Material, 2013, 28(2): 59-65. (in Chinese)
- [5] 周云, 王东胜, 任宪刚, 等. 深海石油钻采隔水管浮力补偿系统的研究[J]. 中国海洋平台, 2016, 31(5): 1-5.
ZHOU Yun, WANG Dongsheng, REN Xiangang, et al. Research of buoyancy compensation system for deep-sea drilling riser[J]. China Offshore Platform, 2016, 31(5): 1-5. (in Chinese)
- [6] 王啟鋒, 杜竹伟, 陈先, 等. 环氧树脂基固体浮力材料的研制及表征[J]. 精细化工, 2005, 22(3): 174-176.
WANG Qifeng, DU Zhuwei, CHEN Xian, et al. Preparation and characterization of solid buoyancy materials based on epoxy resins[J]. Fine Chemicals, 2005, 22(3): 174-176. (in Chinese)
- [7] 许亮斌, 蒋世全, 姜伟. 深水钻井隔水管浮力块配置方法研究[J]. 中国海上油气, 2009, 21(1): 51-54.
XU Liangbin, JIANG Shiquan, JIANG Wei. Buoyancy modules configuration method of deepwater drilling riser[J]. Offshore Oil and Gas, 2009, 21(1): 51-54. (in Chinese)
- [8] 冯玮, 杜庆贵, 李迅科, 等. 半潜式钻井平台运动性能分析的典型装载工况选择方法[J]. 中国海洋平台, 2015, 30(1): 84-89, 95.
FENG Wei, DU Qinggui, LI Xunke, et al. The selection of typical loading cases for motion analysis of a semi-submersible drilling platform[J]. China Offshore Platform, 2015, 30(1): 84-89, 95. (in Chinese)
- [9] 王耀锋, 王定亚, 任克忍, 等. 海洋钻井隔水管浮力块配置方法[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(6): 35-38.
WANG Yaofeng, WANG Dingya, REN Keren, et al. Buoyancy modules configuration method of marine drilling riser[J]. Drilling Petroleum Techniques, 2011, 39(6): 35-38. (in Chinese)
- [10] 刘彩虹, 杨进, 曹式敬, 等. 海洋深水钻井隔水管力学特性分析[J]. 石油钻采工艺, 2008, 30(2): 28-31.
LIU Caihong, YANG Jin, CAO Shijing, et al. Drilling riser mechanical characteristic of marine deep water[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2008, 30(2): 28-31. (in Chinese)
- [11] Yang J, Liu C H, Liu H B, et al. Strength and stability analysis of deep sea drilling risers[J]. Petroleum Science, 2007, 4(2): 60-65.
- [12] 中国船级社. 海上移动平台入级规范(2012)[M]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
China Classification Society. Classification of offshore mobile platforms(2012)[M]. Beijing: China Communications Press, 2012. (in Chinese)
- [13] Tan L B, Chen Y, Jaiman R K, et al. Coupled fluid-structure simulations for evaluating a performance of full-scale deepwater composite riser[J]. Ocean Engineering, 2015, 94: 19-35.
- [14] Dai W, Gao F, Bai Y. FEM analysis of deepwater drilling risers under the operability and hang-off working conditions[J]. Journal of Marine Science and Application, 2009, 8(2): 156-162.
- [15] 戴伟. 基于响应面方法的立管结构可靠性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
DAI Wei. Research on reliability of riser structure based on response surface method[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012.