

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2018.02.022

抛弃式复合材料浮标设计及入水冲击模拟

吴晖

(海军驻武汉 701 所军事代表室, 武汉 430000)

摘要:为改进钢制海洋浮标不耐腐蚀、投放不方便、成本高的缺陷,提出了方便人工布放的抛弃式复合材料浮标设计,详细介绍了复合材料浮标壳体的材料选型,对所选材料在不同地区进行自然老化试验,通过拉伸性能、剪切强度和压缩强度等性能的测试考察了材料的环境适应性。通过重叠网格和冲击动力学技术模拟了浮标入水冲击问题,同时结合相应试验数据,研究了复合材料浮标的结构强度以及入水姿态变化规律,验证了复合材料建造抛弃式浮标的可靠性和可行性。

关键词:复合材料;浮标;设计;强度;入水冲击

中图分类号: U661.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2018)02-0110-06

Abandoned Composite Buoy Design and Water Impact Simulation

Wu Hui

(Navy in Wuhan 701 Military Representative Room, Wuhan 430000, China)

Abstract : In order to overcome the defects of steel buoy such as not stand the corrosion, inconvenient placement and high cost, the design of abandoned composite buoy facilitated manual placement was put forward. The materials selection of composite buoy shell was introduced in detail. Natural aging tests were done for the selected materials in different areas, and the environmental suitability of the materials was investigated by the test of tensile strength, shear strength and compressive strength. The problem of water-entry impact was simulated by overlapping grid and impact dynamics, combined with the corresponding experimental data, the structural strength of the composite buoy and the law of the change of water attitude were studied, and the reliability and feasibility of the composite construction of abandoned buoys were verified.

Keywords : composite ; buoy ; design ; strength ; water-entry impact

海洋浮标是一种搭载各种监测设备和传感器的平台,能够长期工作于海洋环境中,监测和传输数据至后台,具有不间断监测、寿命长、多功能、成本低、生存能力强、低能耗、无污染、覆盖范围广等优点^[1],是研究和开发海洋的必备工具。

近年来,各国对于海洋的开发不断深入,对于浮标的设计开发也越来越重视,对于浮标的要求也越来越高。伴随着我国海洋战略的实施,各种浮标的研制迫在眉睫,目前我国海洋浮标正朝着可靠度高、功能全面、工作寿命长、布放简便等方向不断发展,其中抛弃式浮标因质量轻、体积小和投放便利成为研发的重点^[2]。

以前的浮标多以钢质为主,暴露于海洋环境中

长期受到日光、盐雾、海水侵蚀,在表面保护层局部脱落后,其钢结构也会发生腐蚀破坏,从而导致浮标整体发生破坏^[3]。玻璃纤维增强复合材料是由玻璃纤维作为增强体、树脂材料作为基体通过手糊成型、真空辅助成型、树脂传递成型和模压成型等工艺制备而成,其密度约为钢的1/4,水密性和耐海洋环境性好^[4-5]。目前我国海洋中大量投入使用的大多为大型浮标,其体积和质量大,投放需专用吊装设备,制造成本高。因此,针对上述问题,笔者设计了一种小型抛弃式复合材料浮标,其质量与体积都较小,能随船运输。考虑到船上很少有专门设计的浮标投放装置,可以采用人工徒手布放,大大简化了浮标投放过程,也节省了时间与成本。

通讯作者: 吴晖,工程师,主要研究方向为舰船总体及结构技术 E-mail: 64023898@qq.com

收稿日期: 2017-11-16

引用格式: 吴晖. 抛弃式复合材料浮标设计及入水冲击模拟 [J]. 工程塑料应用, 2018, 46(2): 110-115.

Wu Hui. Abandoned composite buoy design and water impact simulation[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(2): 110-115.

关于抛弃式浮标的一个关键问题是入水姿态^[6]的模拟。目前国内有天津大学孙涛等^[7]做过类似的探头入水冲击研究,西工大刘若辰等^[8]对声呐浮标抛投入水受力分析做过研究,国外对浮标的研究从20世纪40年代末就开始了。对于这种人工抛弃式浮标的研究,虽然鲜有人做,但是目前各国都在抓紧研制中。笔者介绍了抛弃式复合材料浮标的材料选型及入水冲击模拟。

1 材料体系选型

浮标壳体部分选用玻璃钢泡沫夹芯三明治结构,在两层玻璃钢结构中间使用硬质泡沫以增加整体结构的刚性和强度。保证浮标质量小、方便人工抛投的同时,满足浮标抛投入水冲击强度和海上正常工作时的结构强度,表层玻璃钢结构也具有优异的耐腐蚀性能。

浮标材料选型主要包括泡沫夹芯材料、增强纤维和树脂基体。泡沫夹芯材料选用戴铂新材料有限公司生产的H系列聚氯乙烯泡沫夹芯材料,其本身具有耐腐蚀、低吸水率的特点,针对浮标不同区域入水冲击受力的不同,在主承力位置使用强度较高的H200型泡沫,次承力位置使用H80型泡沫材料填充,保证强度的同时,充分减小浮标质量。针对增强纤维和树脂基体的选型,增强纤维有中材科技股份有限公司的高强玻璃纤维SW220C、泰兴市久益新材料有限公司的无碱玻璃纤维E800,树脂基体有金陵力联思树脂有限公司的乙烯基430LV树脂、上海新华树脂厂的乙烯基3201树脂,对上述备选纤维和树脂进行组合,分别制备SW220C/430LV, SW220C/3201, E800/430LV复合材料标准试样进行物理力学性能测试。三种材料体系的性能测试数据如表1所示。

表1 备选体系复合材料力学性能测试结果

项目	测试标准	E800 / 430LV	SW220C / 3201	SW220C / 430LV
密度/(g·cm ⁻³)	GB/T 1463-2005	1.75	1.54	1.66
含胶量/%	GB/T 2577-2005	34.0	50.0	35.0
拉伸强度/MPa	GB/T 1447-2005	443	374.25	451.0
拉伸弹性模量/GPa		21.6	14.6	22.2
压缩强度/MPa	GB/T 1448-2005	338.5	302.9	364.0
压缩弹性模量/GPa		3.59	3.06	3.11
剪切弹性模量/GPa	GB/T 3355-2005	3.47	4.02	6.75
剪切强度/MPa		55.4	57.5	63.7
弯曲强度/MPa	GB/T 1449-2005	450.0	334.7	426.9
弯曲弹性模量/GPa		17.0	14.8	18.2
冲击强度/(kJ·m ⁻²)	GB/T 1451-2005	283	107	152
		369	248	294

由于树脂体系不同,SW220C/3201体系采用手糊工艺制备,胶含量偏高,为50%;SW220C/430LV和E800/430LV均采用真空辅助成型工艺制备,胶含量在34%~35%。由表1可知,SW220C/430LV复合材料的拉伸强度、拉伸弹性模量、弯曲弹性模量等均高于E800/430LV体系,各项力学性能也均高于SW220C/3201体系,因此最终选定浮标壳体内外层复合材料为SW220C/430LV体系。

2 复合材料环境适应性研究

浮标复合材料外壳体长期接触海水,因此根据其使用环境来确定老化试验方案,进而评定老化性能,最终根据材料的性能要求来预测使用寿命。

采用真空辅助成型工艺制备复合材料的老化样件,样件的树脂含量约为35%。哑铃状拉伸样件的铺层方式采用0°/90°,织物层数为18层;纵横剪切拉伸试验的样件铺层采用±45°,织物层数为18层;压缩样件采用0°/90°,织物层数为45层。

为了便于进行对比研究和建立相应的预测模型,分别在武汉和三亚进行环境自然老化试验。武汉试验用水按照GB/T 15748-1995配置相应浓度的海水;三亚试验直接采用在海水中挂片试验。分别提取10周,20周,30周,40周和50周自然循环老化的试件,按照GB/T 1447-2005和GB/T 1448-2005对样件进行测试,每个测试项分为两组,一组不作处理(试件分别记为武汉湿、三亚湿),另一组干燥处理(试件分别记为武汉干、三亚干),每组5个平行试件。

2.1 吸水性能

每个循环周期结束后,将试样放置于洁净、通风、干燥处,待试件表面干燥,测量试件质量,按式(1)计算老化后每个试样的吸水增重率,结果见表2。

$$M_t = \frac{W_t - W_0}{W_0} \quad (1)$$

式中: M_t 为吸水增重率; W_t 为浸泡结束后的质量; W_0 为初始质量。

表2 试样吸水增重率

批次	时间/周	吸水增重率/%
1	10	0.38
2	20	0.48
3	30	0.52
4	40	0.53
5	50	0.53

由表2可知,在循环自然老化过程中,试件的吸水增重率都随着老化时间的增加而增大,试件的

吸水增重率的变化大致可分为三个阶段:①增长期,吸水增重率随老化时间的延长增长较快;②增长缓慢期,吸水增重率缓慢增加;③平缓期,增重率变化很小,此时试样已经吸水达到了饱和状态。

2.2 老化性能

(1) 拉伸性能。

分别提取在5个老化试验批次的三亚和武汉老化试件,进行拉伸性能测试,与未老化样件的拉伸性能(拉伸强度为543.7 MPa,拉伸弹性模量为27.8 GPa)进行比较,结果如表3、表4所示。

表3 SW220C/430LV 复合材料的拉伸强度保留率 %

批次	武汉干	武汉湿	三亚干	三亚湿
1	99.02	98.65	98.01	96.99
2	97.60	96.80	96.34	95.37
3	96.56	95.24	95.62	94.67
4	96.32	94.76	95.05	94.20
5	95.70	94.45	94.61	93.90

表4 SW220C/430LV 复合材料的拉伸弹性模量保留率 %

批次	武汉干	武汉湿	三亚干	三亚湿
1	99.00	99.04	99.82	97.79
2	96.77	95.33	94.97	94.30
3	96.50	95.33	94.97	94.10
4	96.30	95.33	94.60	94.10
5	95.70	95.00	94.60	93.90

由表3和表4可知,随着老化时间的增加,SW220C/430LV 复合材料样件的拉伸强度和模量均小幅度降低,进行50周的老化后,试样拉伸强度和拉伸弹性模量的最低保留率仍可达到93.9%,表现出优越的耐老化性能。由于三亚属于高湿热环境,环境更为恶劣,因此老化周期相同的情况下,三亚投放样件的剩余强度和模量均小于武汉投放样件的剩余强度和模量。

(2) 面内纵横剪切强度。

不同试验周期时复合材料的面内纵横剪切强度保留率如表5所示,剪切强度初始值为54.8 MPa。

表5 SW220C/430LV 复合材料的面内纵横剪切强度保留率 %

批次	武汉干	武汉湿	三亚干	三亚湿
1	97.87	95.80	96.35	93.43
2	95.44	92.52	94.53	92.34
3	94.16	92.34	92.52	90.88
4	93.25	91.97	91.60	90.88
5	92.34	91.25	90.88	90.51

由表5可以看出,面内纵横剪切试件老化后的剩余剪切强度的变化规律与拉伸强度相同,与原始未老化试件面内剪切强度值相比,剩余强度最小保留率为90.51%。

(3) 压缩强度。

表6给出了复合材料试件在武汉和三亚各老化周期后的压缩强度保留率,压缩强度初始值为194 MPa。

表6 SW220C/430LV 复合材料的压缩强度保留率 %

批次	武汉干	武汉湿	三亚干	三亚湿
1	97.68	93.47	92.96	91.58
2	88.50	86.80	86.20	84.70
3	85.62	83.90	81.90	79.90
4	84.13	82.53	78.80	77.50
5	80.42	79.50	74.80	74.50

由表6可知,压缩强度保留率展现出与拉伸相同的规律,但强度的变化幅度大于拉伸强度的变化幅度。与原始未老化试件相比,剩余强度最大下降幅度为25.5%。三亚投放样件的压缩剩余强度和模量均小于武汉投放样件的剩余强度和模量,经过30周的老化后,三亚直接在海水中挂片试验(三亚湿)后的压缩强度剩余为79.9%;经过50周的老化后,压缩强度剩余为74.5%。

根据上述测试结果可知,对于SW220C/430LV 复合材料体系,在三亚海水中进行挂片试验工况最为恶劣,但经过50周的老化,试样拉伸强度和拉伸弹性模量的保留率仍可达到93.9%,面内纵横剪切强度保留率90.51%,压缩强度保留率为74.5%。另外,浮标表面涂覆有耐海洋性气候油漆,且浮标的设计使用周期为半年,因此浮标在海洋环境下经过半年时间,其结构强度仍能满足使用要求。

3 浮标入水冲击数值模拟

随着计算机性能的高速发展和计算流体力学(CFD)的理论愈发成熟^[9-11],各种商业软件都运用到产品研发中。浮标入水冲击的CFD模拟采用的是基于粘性理论的软件Star ccm+,结构计算采用的是Abaqus软件,动网格方式为重叠网格^[12],设计采用的是复合材料,而复合材料是各向异性的,在分析过程中必须考虑这一点。此外,研究讨论的复合材料仅限于线弹性材料,需要考虑线弹性、各向异性材料的应力应变关系^[13-14]。

数值模拟浮标的入水冲击水动力问题和结构问题,水动力计算网格如图1所示。流体计算中,网格采用六面体切割网格,网格数为50万左右,动网格形式为重叠网格,可以模拟大幅度运动。考虑到冲击中湍流的影响较小,同时为了提高计算效率,在处理物理模型上选择层流模型,浮标的运动模型选择的是六自由度的DFBI模型,具体如图2所示。

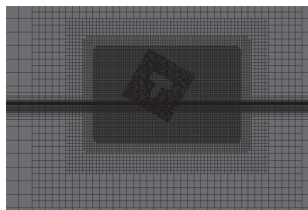
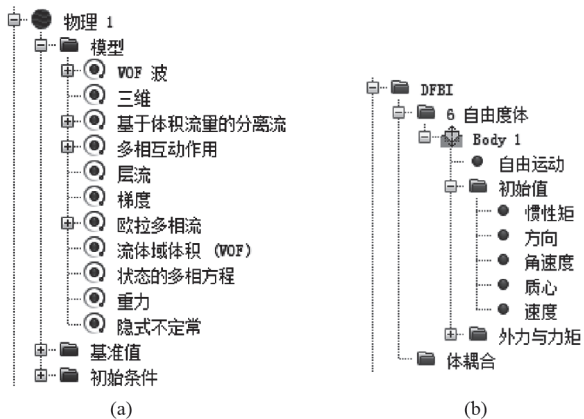


图1 流体计算网格



a—物理模型设置; b—运动模型设置

图2 流体计算设置

结构有限元计算需要对不同部件进行网格划分,大致网格如图3所示。建模时将浮标上所有部件都包含进去,分别赋予材料属性。假设每层铺层厚 0.2 mm,根据厚度不同定义不同数量的铺层。铺层角度为按照由底至上 $0^\circ/45^\circ/-45^\circ/90^\circ$ 的角度循环重复,如图4所示。

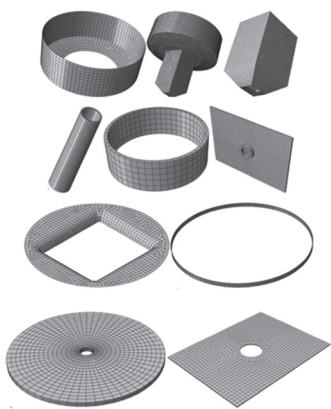


图3 结构计算网格

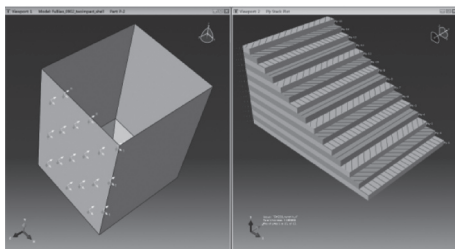


图4 浮标结构铺层设置

玻璃纤维采用 SW220C 高强玻璃纤维,密度取 1600 kg/m^3 ,由于其为各向异性材料,需定义不同方向的弹性模量 (E)、泊松比 (ν) 与剪切模量 (G),查文献得: $E_{11}=E_{22}=18.22 \text{ GPa}$, $E_{33}=6 \text{ GPa}$, $\nu_{12}=0.12$, $\nu_{13}=0.3$, $\nu_{23}=0.3$, $G_{12}=G_{13}=6.75 \text{ GPa}$, $G_{23}=3 \text{ GPa}$ 。

泡沫夹心采用 H80 与 H200 聚氯乙烯泡沫,密度分别为 $80, 200 \text{ kg/m}^3$,最小压缩弹性模量分别为 $80, 265 \text{ MPa}$ 。

为了评估浮体在冲击载荷作用下的变形及材料损伤程度,采用 Hashin 失效准则。SW220C/430LV 体系的 Hashine 失效因子分别为 HSNFCCRT, HSNFTCRT, HSNMCCRT, HSNMTCRT, 分别表示纤维压缩失效、纤维拉伸失效、基体压缩失效、基体拉伸失效。模拟过程采用流固单向耦合方式,根据流体计算结果为结构计算提供压力载荷条件,极大地提高了前期浮标设计效率。

4 浮标入水冲击计算结果

试验采集的数据主要有加速度、倾斜角度两个值,其中,由于试验条件的局限性,只能采集到初始倾斜角为 0° 时的加速度值,因为初始有倾斜角度时,高速摄像机捕捉点的位移变化在相片中不能代表实际高度变化,所以综合计算与试验结果,对比的参数有初始为 0° 时的加速度值,以及初始带倾角的浮标入水倾角变化。

4.1 试验加速度与仿真结果对比

通过无线姿态传输仪得到 5 m 高度抛投时浮标的入水加速度的变化曲线如图5所示。

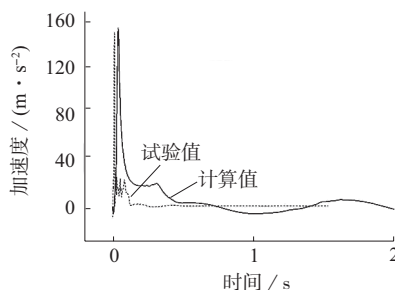


图5 加速度值对比

从图5可以看出,试验采集到的最大加速度值为 154.39 m/s^2 ,数值仿真结果为 153.12 m/s^2 ,计算结果与试验结果误差不大。

4.2 入水角度与仿真结果对比

初始竖直状态入水基本不会存在角度变化,所以角度变化只有在初始有一定横倾角的情况下才会出现,图6所示为 5 m 高度初始横倾角为 30° 的浮标入水后的角度变化曲线。

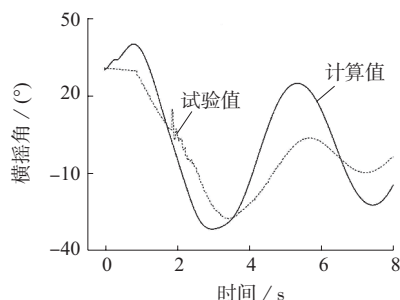


图6 浮标入水角度变化曲线

从图6可以看出,试验中,浮标入水后直接是往正浮状态恢复,翻转到另一边最大角度为 30° 左右;而对于数值仿真来说,浮标角度先增加到 40° ,然后向正浮状态恢复,翻转后最大角度也为 30° 左右。

4.3 结构计算结果分析

结构计算主要是考虑垂直入水时的情况,因为在这种情况下是最危险的,而结构计算依据流体计算结果分析。浮标入水过程中发生了两次冲击,第一次是电池舱底部,冲击持续时间约20 ms,竖直方向峰值冲击力约2800 N,等效到底面的冲击压强约为0.398 MPa;之后冲击力下降至1235 N,并维持17 ms不变之后发生第二次冲击,位于下浮体圆锥面与圆柱底面上,持续时间约53 ms,竖直方向峰值冲击力约为15500 N,等效到圆柱底面及圆锥面上的冲击压强约0.04737 MPa,然后冲击力下降至

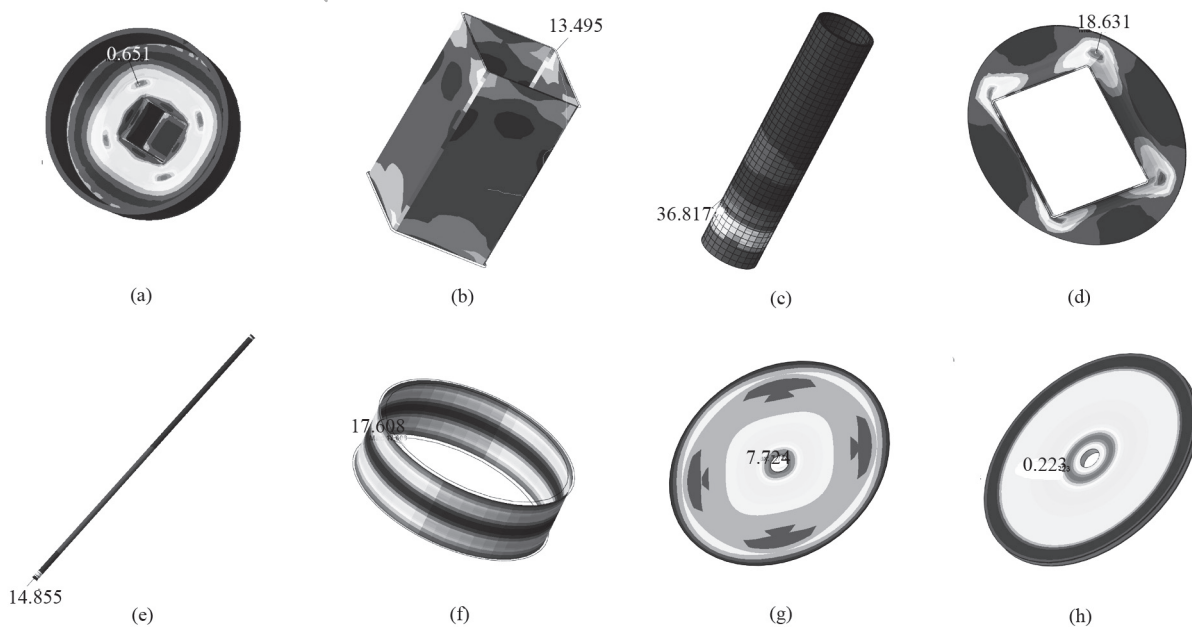
1235 N,维持30 ms不变。

进入Abaqus软件的后处理界面,分别找出各部件最大Mises应力产生的时刻。对于复合材料部件,还需比较不同铺层的应力大小,从而确定应力最大的层,并输出结果。最后得到的关键部件Mises应力云图如图7所示。

由图7可知,所有玻璃纤维铺层中最大的Mises应力出现在图7d电池舱与浮体外部过渡部位的圆角处,最大Mises应力为18.631 MPa,其中 $S_{11}=19.04$ MPa, $S_{22}=19.4$ MPa, $S_{12}=5.382$ MPa。此处纤维承受的力主要为压应力,SW220玻璃纤维的压缩强度为186.77 MPa,剪切强度为63.69 MPa,实际应力远小于许用应力,且抗压安全系数、抗剪切安全系数分别为9.6及11.8,因此玻璃纤维的强度满足要求。

碳纤维最大Mises应力出现在图7c碳纤维支撑杆加强筋上,部位在加强筋与上浮体内圆柱面接触处,最大Mises应力为36.817 MPa,其中 $S_{11}=-18.97$ MPa, $S_{22}=1.91$ MPa, $S_{33}=3.38$ MPa, $S_{13}=-4.7$ MPa,碳纤维Y方向压缩强度为194 MPa,剪切强度为85.8 MPa。实际应力远小于许用应力,且抗压安全系数、抗剪切安全系数分别为10.2与18.2,因此碳纤维强度满足要求。

聚氯乙烯泡沫夹心最大Mises应力出现在



a—浮体电池舱;b—电池舱内部玻纤层;c—支撑杆加强筋;d—电池舱与浮体外部过渡部位;
e—碳纤维支撑杆;f—上浮体内部圆柱玻纤;g—上浮体下部圆柱玻纤;h—上浮体泡沫

图7 复合材料浮标结构计算应力云图

图 7a 浮体电池舱泡沫上, 为 0.651 MPa, 其中 $S_{11}=1.068$ MPa, $S_{22}=0.95$ MPa, $S_{33}=1.026$ MPa, $S_{12}=0.294$ MPa, $S_{13}=0.152$ MPa, $S_{23}=0.299$ MPa。应力最大的部位泡沫材料为 H200, H200 系列聚氯乙烯泡沫最小拉伸强度为 6.3 MPa, 压缩强度为 4.5 MPa, 剪切强度为 3.2 MPa, 实际各向应力均小于许用值, 抗拉强度安全系数为 5.9, 抗压强度安全系数为 4.2, 抗剪切安全系数为 10.7, 因此聚氯乙烯泡沫强度满足要求。

5 结论

使用复合材料生产抛投式浮标, 其入水冲击问题是浮标设计的关键问题之一, 冲击力、加速度等关系到结构计算, 而入水姿态跟电子仪器是否会受损相关。使用重叠网格和冲击动力学技术模拟了浮标入水冲击问题, 同时结合浮标的两次不同角度入水冲击试验, 对比了加速度和运动姿态计算结果与试验结果, 分析了数值仿真模拟入水冲击问题的准确性, 也为结构计算提供了可靠的初始条件。

文中结构计算只模拟了浮标垂直入水时复合材料浮标结构强度问题, 对各个部件最大应力值做了分析, 结合复合材料玻璃纤维、碳纤维、聚氯乙烯泡沫的材料性能以及试验结束后浮标破损情况, 验证了这种流固单向耦合模拟方式对于复合材料浮标初步设计的可行性, 为复合材料低速入水冲击类产品的设计提供了新的手段。

参考文献

- [1] 孙辰. “白龙”浮标标体设计及动力学分析 [D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2014.
Sun Chen. The design of buoy body “Bai Long” and its dynamics Analysis [D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2014.
- [2] 戴洪磊, 牟乃夏, 王春玉, 等. 我国海洋浮标发展现状及趋势 [J]. 气象水文海洋仪器, 2014, 31(2): 118–121, 125.
Dai Honglei, Mou Naixia, Wang Chunyu, et al. Development status and trend of ocean buoy in China [J]. Meteorological, Hydrological and Marine Instruments, 2014, 31(2): 118–121, 125.
- [3] 白如冰. HF2.0 GRP-D1 型玻璃钢浮标简介 [J]. 交通标准化, 1994(4): 39.
Bai Rubing. Introduction of the HF2.0 GRP-D1 buoy [J]. Transportation Standardization, 1994(4): 39.
- [4] 刘愉强, 盛岩峰, 何红辉, 等. 玻璃钢浮标材料的增强改性探讨 [J]. 材料开发与应用, 2008(5): 30–33.
Liu Yuqiang, Sheng Yanfeng, He Honghui, et al. Modification of fiber reinforced plastics for buoys [J]. Development and Application of Materials, 2008(5): 30–33.
- [5] 唐原广, 李琛. 多功能波浪浮标的研制 [J]. 气象水文海洋仪器, 2004(Z1): 12–15.
Tang Yuanguang, Li Chen. The development of multi-function wave buoy [J]. Meteorological, Hydrological and Marine Instruments, 2004(Z1): 12–15.
- [6] 秦洪德, 赵林岳, 申静, 等. 入水冲击问题综述 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011(5): 152–156.
Qin Hongde, Zhao Linyue, Shen Jin, et al. A review of the impacting of into water [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011(5): 152–156.
- [7] 孙涛, 黄银水, 陶建华. 抛弃式温盐探头运动状态的数值模拟及其实验验证 [J]. 海洋通报, 2002, 21(2): 69–76.
Sun Tao, Huang Yinshui, Tao Jianhua. The design of buoy body “Bai Long” and its dynamics analysis [D]. Marine Science Bulletin, 2002, 21(2): 69–76.
- [8] 刘若辰, 王英民. 声呐浮标空投入水受力特性仿真研究 [J]. 水声工程, 2011(10): 59–62.
Liu Ruochen, Wang Yingmin. Research of water-entry mechanical property of sonobuoy [J]. Underwater Acoustic Engineering, 2011(10): 59–62.
- [9] 王献孚. 计算船舶流体力学 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1992.
Wang Xianfu. Computational fluid dynamics [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 1992.
- [10] Paterson E G, Wilson R V, Stern F. General-purpose parallel unsteady rans ship hydrodynamics code: CFDSHIP-IOWA [R]. IIHR Technical Report No.432, 2003.
- [11] Carrica P M, Wilson R V, Noack R, et al. A dynamic overset singlephase level set approach for viscous ship flows and large amplitude motions and maneuvering [C]//Th26 Symposium on Naval Hydrodynamics 2006, Korea, 2006.
- [12] 赵发明, 高成君, 夏琼. 重叠网格在船舶 CFD 中的应用研究 [J]. 船舶力学, 2011, 15(4): 332–341.
Zhao Faming, Gao Chenjun, Xia Qiong. Overlap grid research on the application of ship CFD [J]. Ship mechanics, 2011, 15(4): 332–341.
- [13] 陈亚军. 动力学参数对复合材料层压板低速冲击损伤特性的影响研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
Chen Yajun. Effect of dynamics parameters on low-velocity impact damage in composite laminates [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014.
- [14] 张思进, 傅衣铭, 陆启韶. 对称角铺设矩形叠层复合材料板受低速冲击时的解层破坏分析 [J]. 湖南大学学报, 2009, 36(1): 63–67.
Zhang Sijin, Fu Yiming, Lu Qishao. Analysis of Delamination failure of rectangular laminated composite plate placed with symmetric corners under low velocity impact [J]. Journal of Hunan University, 2009, 36(1): 63–67.