

中国首台深海载人潜水器——蛟龙号

刘峰^{①*}, 崔维成^②, 李向阳^①

① 中国大洋矿产资源研究开发协会, 北京 100860;

② 中国船舶科学研究中心, 无锡 214082

* E-mail: liufeng@comra.org

收稿日期: 2010-09-03; 接受日期: 2010-11-09

载人潜水器是深海探测必不可少的装备, 除载人潜水器之外没有其他装备可以把科学家直接带到超常深海海底开展现场探查和研究. 中国科学家长期以来就梦想乘坐我国自行研制的载人潜水器在海洋地质、海洋地球物理、海洋生物和海洋化学等领域开展深海研究^[1-6]. 近年来, 中国载人潜水器技术的快速发展使这一梦想变为现实.

载人潜水器(2010年被命名为“蛟龙号”)研制项目于2003年正式启动. 经过概念设计、初步设计、详细设计、加工建造、总装联调和水池试验等不同研制阶段, 分别于2009年和2010年成功开展了1000 m和3000 m级的海上试验.

1 “蛟龙号”的使命、设计及其技术指标

“蛟龙号”的主要使命是将科学家、工程师及各种仪器设备带到起伏多变的深海海底, 通过潜水器定高巡航、水中悬停定位、坐底等工作模式, 开展海洋地质、地球物理、生物和化学等方面的科学研究.

“蛟龙号”可执行多项科考任务, 其中包括: (1) 沉积物、浮游生物定点取样; (2) 富钴结壳区域小型钴芯取样; (3) 测量海水温度、获取活动热液喷口中心或指定位置的水样; (4) 跟踪地形和离底定高巡航, 绘制高精度测深侧扫地形地貌图; (5) 特定目标(如沉船等)的照相和摄像; (6) 深海装置的定点布放与回收、海洋结构物(如: 管道和电缆等)的维护与检查.

“蛟龙号”设计考虑的主要原则包括: (1) 成本有效性原则. 一次下潜尽可能获得多的数据和样品, 尽

可能带更多的科学家到达海底开展工作. (2) 环境友好性原则. 水中巡航尽可能安静, 抛载物对海底危害尽可能小. (3) 便于装配与维护原则. (4) 人体工程学原则. 采取综合措施, 创造尽可能舒适的舱内环境, 以避免潜航员和科学家长时间作业和观察产生疲劳. (5) 海况. 可以满足4级海况布放, 5级海况回收.

为了确保潜水器的机动操作性能, 在概念设计、初步设计和详细设计等阶段, 相继进行了线形成型设计、阻力分析、水动力布置、操作性测试和无动力上浮下潜试验等工作. “蛟龙号”总布置图(图1)发挥了很好的作用, 为各种设备分配了相应的职能, 协调了相互冲突、划清了相互界面, 保证了设备间的一致性, 避免了各设备间的相互干扰.

“蛟龙号”型似鲨鱼, 稳定翼呈X状布置. 推进器提供不同方向的推力矢量. 4个管道浆作为主推力器呈十字形分布在潜水器艏部. 潜水器艏部有1个槽道浆, 同时潜水器中部两侧各布置1个可旋转的管道浆. 操作时通过控制系统, 可使载人潜水器具备6自由度空间运动能力. 为了节省能源, 载人潜水器上浮下潜过程采用无动力设计.

内径2100 mm的钛合金载人球由12块球瓣和2块球形底板构成, 球瓣和球形底板均由平板坯锻造加工成型. 焊接后的半球置于专用炉中进行热处理, 以释放残余应力和降低半球因机加工造成的变形. 载人球采用手工TIG焊接, 每道焊接工序完成后均采用流体渗透、X射线和超声波三种方法对其进行检测, 以检测焊接缺陷.

圆锥形出入舱口和观察窗设计也是载人球设计

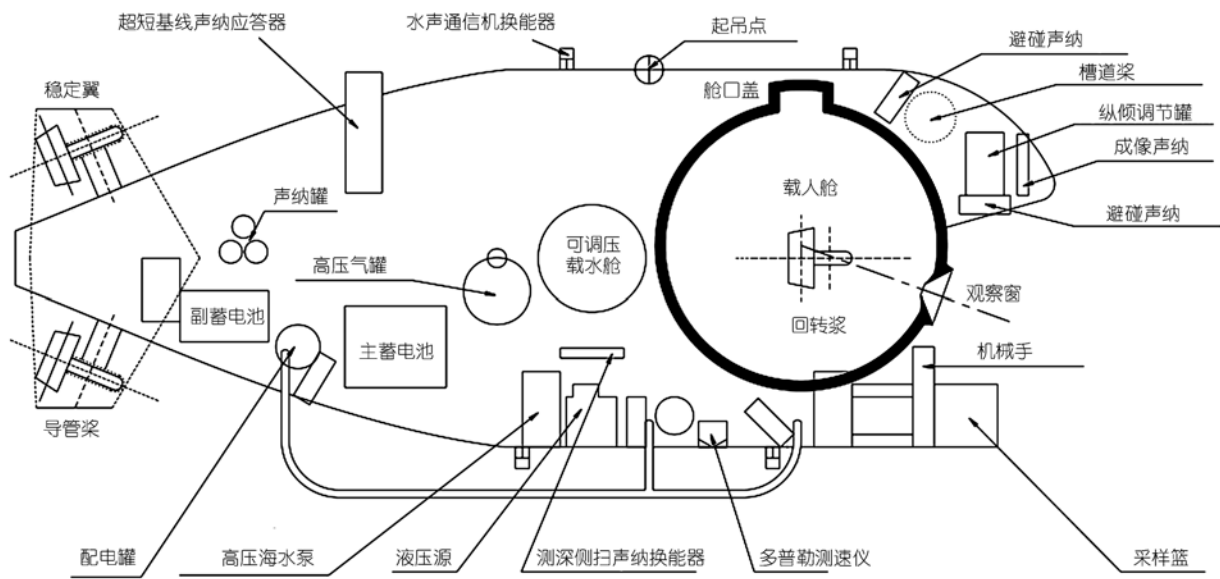


图1 “蛟龙号”总布置图

的关键技术之一。我们通过反复有限元分析计算,优化了出入舱座的几何尺寸,保证了在工作压力下出入舱口和舱口盖变形协调一致,实现了舱口盖的良好密封,避免了最大弯曲应力的出现。

为了验证载人球的加工制造性能,我们采用3种压力试验对其进行了测试,分别是:(1)从0到71 MPa,再从71 MPa降低到0的6次循环压力试验;(2)78 MPa压力下1 h保压试验,以考核1.1倍工作压力下的结构强度和密封性能;(3)71 MPa工作压力下8 h长时间保压试验。在该试验中,压力上升和下降速度与载人潜水器在海中的实际上浮下潜速度一致。持续时间与潜水器海底作业时间一致。应力分布和观察窗蠕变速度反映了真实的工作状态。以上所有试验结果显示,应力分布与设计计算吻合一致,球壳密封能力良好,未发现塑性变形。

“蛟龙号”的主框架采用钛合金焊接的空间结构框架。通过两倍等量载荷分布试验,模拟了潜水器回收工况。试验结果显示,主框架应力分布同设计计算结果一致。

通信系统包含水面和水下两个组成部分。其中,潜水器下潜前和浮出水面后与支持母船间的通信采用甚高频通信,下潜和海底作业期间与支持母船间的语音、图像和文字交流采用水声通信。

“蛟龙号”主要有两种导航方法。正常状态下,依靠装在船上的超短基线声纳阵和潜水器上的声信标

进行导航。通过计算声纳阵与声信标之间的距离得到潜水器相对于船的位置,再通过叠加支持母船的DGPS信息可以计算出潜水器绝对地理指标,这些信息通过水声通讯传给潜水器。第二种导航方法称为“组合导航系统”,通过潜水器自身的计算功能来实现导航。根据潜水器运动传感器、多普勒声纳、光纤陀螺和深度传感器信息,通过时间积分可以估算出潜水器相对于起始点的位置。超短基线声纳或声学通信系统一旦失效,组合导航系统即可启用。

“蛟龙号”拥有手动和自动控制两种巡航模式。自动模式下,潜水器可以实现定向、定深(定高)和定点悬停等功能,该模式能够大幅提升潜水器的导航能力,减轻潜航员的工作强度。

“蛟龙号”装有大量的探测设备。其中包括石英卤素灯、HID和HIM等8个水下灯源;2台摄像机和1台照相机;1台成像声纳(最大作用距离为200 m)和7台避碰声纳;1台多普勒海流测速仪;1部能够探测不同海底地形小目标的测深侧扫声纳;2只七功能机械手可以完成相关装置的布放与回收。沉积物取样器、热液保压取样器和岩芯取样器可根据任务需要安装在潜水器上。

安全性是潜水器研制过程中最重要的考量。除潜水器正常抛载外,为了保证潜水器海底被缠绕后能够解脱,以确保潜航员和主要设备的安全,安装在潜水器上的机械手液压管路、蓄电池电缆及其固定螺

栓均可被切割抛载. 海试前对这些机构进行了大量的测试, 结果显示, 所有抛载机构均能很好地完成设计使命^[7,8].

“蛟龙号”技术指标与世界同类型现役载人潜水器相比毫不逊色. 具体技术指标见表 1.

2 水池试验与海试

在水池试验中我们对“蛟龙号”做了大量的测试工作, 比如生命支持系统性能测试、紧急抛载装置测试、避碰声纳测试、1 节速度下潜水器制动距离测试等. 海试前, “蛟龙号”已在中国船舶科学研究中心直径 85 m, 最大深度 15 m 的露天水池中完成了近百次的水池下潜. 每次试验, 从试验准备、试验过程到设备维护均严格按照海试程序执行^[9].

一次典型的下潜流程可分为八个步骤: 准备、布放、下潜、巡航、执行任务、上浮、回收和维护. 每

表 1 “蛟龙号”技术指标

参数	技术指标
最大工作深度(m)	7000
尺寸(m)	8.3×3.0×3.2
载人球内径(m)	Φ2.1
材料	钛合金
空气中重量(t)	22
吊放回收方式	单点起吊
乘员	1 名潜航员, 2 名科学家
生命支持系统	12 h(正常状态), 74 h(应急状态)
有效载荷(kg)	220
电源及供电	充油银锌电池, 电量大于 110 kWh
水下时间(h)	12
速度	巡航速度 1 节; 最大速度 2.5 节
导航系统	超短基线, 激光陀螺
控制模式	手动、自动
动力定位	定点悬停定位
通信系统	VHF 通信, 水下电话, 2 套水声通信
机械手	七功能伺服机械手 1 只, 七功能开关机械手 1 只
灯光系统	2 只 HMI 灯, 2 只 HID 灯, 4 只石英卤素灯
摄像机	3CCD 摄像机 1 台, 1CCD 摄像机 2 台
照相机	1 台
声学观测系统	成像声纳, 测深侧扫声纳(覆盖范围 2×200 m)
避碰声纳	7 只
作业工具	沉积物取样器(容量 1 L), 岩芯取样器(直径 50 mm, 长度 200 mm), 热液保压取样器(500 mL)

个步骤又分解成若干小的操作. 所有海试队员都有一张操作流程图以确保各岗位熟知当前和下一步的具体操作, 从而保证海试更加安全. 假如进行一次 7000 m 深度下潜的话, 通常情况下需要 12 h, 包括起吊回收各 0.5 h, 上浮下潜各 2.5 h, 海底工作时间 6 h. 很显然, 下潜上浮的时间取决于下潜的深度. 例如, 在浅水试验时, 下潜上浮时间会短一些, 那么水下执行任务时间就可以更长一些. 一个下潜一般从早晨开始, 下午天黑前结束.

2009 年 8 月 6 日至 10 月 19 日, “蛟龙号”进行了第一阶段海试. 此次海试中, “蛟龙号”相继完成了 50, 300 和 1000 m 级的试验内容, 成功下潜 20 次. 在 10 月 3 日第 20 次下潜中, 最大下潜深度为 1109 m.

2010 年 5 月 31 日至 7 月 18 日, “蛟龙号”海试历时 49 天, 搭载三人顺利完成了 17 次下潜, 总下潜次数达到 37 次. 其中, 4 次穿越 3000 m 深度, 最大下潜深度达到 3759 m, 最长水中时间 9 小时 3 分, 创造了中国载人潜水器的记录.

“蛟龙号”实现了多次坐底, 并在一次下潜中实现了“蛙跳”式坐底. 通过坐底, “蛟龙号”利用机械手成功完成了插国旗、取水样、布放“龙宫”标志物等作业内容. 潜水器还拍摄了大量海底照片, 并录制了数小时的近底生物视频. 在一次下潜中, 成功将 2 只海参捕获到采样篮中, 其中较大的 1 只长 250 mm.

海试中, “蛟龙号”的机动性能和控制性能得到了检验, 完成了定深、定向和定高功能测试(图 2).

由地质考察船改装而成的“向阳红 09”船是“蛟龙号”海试的支持母船. 由于其船龄已超 30 年, 噪音大, 致使水声通信距离和通信质量在海试中受到了一定程度的影响. 为了确保“蛟龙号”和母船间指令、数据

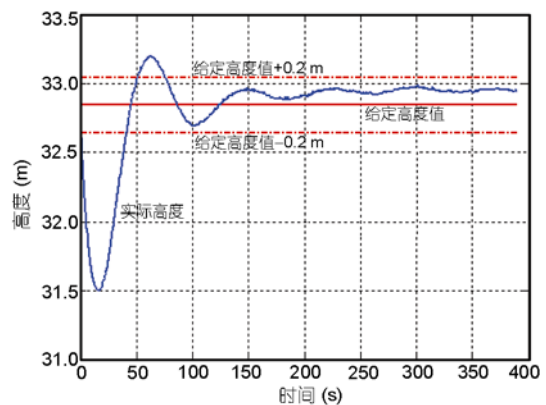


图 2 自动定高

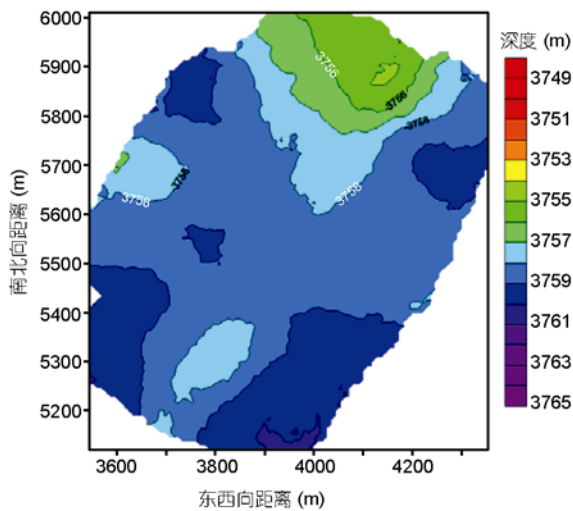


图3 海底测绘

和图像通信正常, 船长在潜水器下潜期间被迫关掉“向阳红 09”船的一台主机。“蛟龙号”利用测深侧扫声纳对指定区域进行了高精度的海底地形测量(图 3)。载人球内生命支持参数、电池消耗量、CTD 数据、潜水器速度、方向、横倾与纵倾角度及其他信息都可以通过“蛟龙号”与“向阳红 09”船间的数据图像传输, 清楚地显示在母船的监控屏上。

3 小结

通过 37 次下潜试验, “蛟龙号”的功能性能得到了全面验证, 水下最长时间达到 543 min, 在第 37 次下潜中最大下潜深度达到 3759 m, 成功获取了 525 mL 保压海水水样。试验结果显示, “蛟龙号”载人潜水器的所有功能和性能均与设计指标一致。

致谢 本文是一个团队的工作成就, 不仅包括本文作者, 而且包括所有项目参与者。非常感激徐芑南、吴崇健、张艾群、朱维庆、胡震、刘涛、王晓辉、朱敏研究员、张新宇和余建勋高工, 他们都为“蛟龙号”的研制和海试做出了重要贡献。感谢“蛟龙号”各位潜航员, 尤其是首席潜航员叶聪先生。感谢“向阳红 09”船窦永林船长, 他的精心操船保证了试验的顺利开展。同时, 我们诚挚感谢国家科学技术部、国家海洋局对项目经费的支持和组织保障, 感谢各研究院所对“蛟龙号”研制与海试的积极支持。由于篇幅限制, 我们无法将国内各个领域专家的名字逐一列出。

参考文献

- 1 Nanba N, Morihana H, Nakamura E, et al. Development of deep submergence research vehicle “SHINKAI 6500”. Techn Rev Mitsubishi Heavy Industr Ltd, 1990, 27: 157—168
- 2 Momma H. Deep ocean technology at JAMSTEC. Mar Technol Soc J, 1999, 33: 49—64
- 3 Vadim V K, Jury K M. About designing experience of submarines and deep submersibles from titanium alloys in bureau “MALACHITE”. Titanium’99, 1999. 1125
- 4 Sagalevitch A M. Experience of the use of manned submersibles in P. P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences. In: Proceeding of the 1998 International Symposium on Under-water Technology, 1998. 403
- 5 Kohnen W. Manned research submersibles: State of technology 2004/2005. MTS J, 2005, 39: 122—127
- 6 <http://www.unols.org/meetings/2006/200605des/200605desmi.html>
- 7 崔维成, 徐芑南, 刘涛, 等. 7000 m 载人潜水器研发简介. 上海造船, 2008, (1): 14—17
- 8 崔维成, 徐芑南, 刘涛, 等. 和谐号载人潜水器的设计与建造. 船舶科学技术学报, 2008, 30: 17—25
- 9 胡震, 王晓辉, 朱敏, 等. 和谐号载人潜水器水池试验. 见: 第三届亚太地区潜水与水下技术会议论文集. 6 月 14—15, 2008