

深海腐蚀检测用水密电子舱设计

李 强¹, 李 焰^{1,2}

(1. 中国石油大学(华东) 机电工程学院, 山东 青岛 266580; 2. 中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071)

摘要: 设计了一种可在 300 m 水深条件下进行腐蚀电化学在线检测作业的水密电子舱, 它主要由耐压水密壳体以及集成在壳体外部的插接件式电极系统和多孔屏蔽罩组成。耐压壳体由圆柱形筒体和加强型平盖构成, 满足设计条件下的强度、密封、防腐要求。三电极系统采用水密接插件式设计, 安装在加强型平盖上; 电极系统与外部多孔罩组成开放屏蔽式电解池, 可在水下进行在线电化学测试。

关键词: 深海腐蚀检测; 耐压壳体; 开放屏蔽式电解池; 插接件式电极; 电化学检测

中图分类号: TH122 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3096(2013)11-0064-05

开发和利用位于深海海底的油气、矿产资源是世界各国密切关注的热点问题^[1]。发展深海环境腐蚀测试技术^[2]和系统, 现场获取基础腐蚀数据, 可以掌握材料在不同海域、不同深度水层的腐蚀行为和机理, 为深海资源开发和利用提供技术保障和支持。但目前能够胜任水下在线电化学测试的腐蚀检测系统还比较缺乏。

耐压壳体作为主要的承力结构, 在复杂的深海高压环境下, 可为各种测试仪器、设备提供安全的承压操作和运行环境^[3]。针对深海腐蚀检测技术的发展需求, 本文设计了一种可在 300 m 以内水下进行现场腐蚀检测作业的水密电子舱。该电子舱采用圆柱形耐压壳体, 并在壳体外部集成了插接件式电极系统和多孔屏蔽罩。将此水密电子舱与电化学在线测试仪集成并安装在水下机器人(ROV)上, 可随 ROV 布放到目标海域测试海水腐蚀特性。

1 耐压壳体的设计

1.1 壳体结构组成

耐压壳体主要用于安置电化学在线测试仪、工控计算机和电源等, 为保证它们不会因海水静压力和腐蚀而损坏, 必须保证壳体有足够的强度和可靠的密封。耐压壳体的形式多样, 包括球形壳体、半球形封头圆柱形壳体、多球形壳体、半球形封头圆柱形壳体和圆锥形壳体的组合体、椭圆形壳体以及方形、长方形壳体等^[4], 从加工工艺性、空间利用率、工作水深和测试电极系统安装方面考虑, 本文采用了圆柱形筒体、两端为平板法兰盖(以后简称平盖)的结构设计。筒体和平盖之间采用双层 O 型圈密封

设计, 通过 6 个周向均布的螺栓进行紧固连接。两端平盖上开有多个内螺纹孔, 分别用于安装电极系统水密接插件、数传电缆水密接插件及多孔屏蔽罩。整体结构如图 1 所示。

1.2 材料选用

考虑到深海环境条件下面临的静水压和腐蚀问题, 制造耐压容器的材料一般是采用具有高比强度、高比刚度的金属或非金属材料^[5], 例如铝合金、船用钢、钛合金、纤维增强复合材料等等, 并对其物理性能做周密的考虑, 以保证所设计的水密电子舱在给定的海洋环境下具有良好的性能。在选择壳体材料以及它们的焊接或联接材料时, 还必须综合考虑腐蚀、应力腐蚀开裂、低周疲劳、蠕变、消除应力后材料的变脆、脆裂、断裂韧性、可焊性、可成型性等因素。此外, 对于所选用材料, 其研制成本和材料是否容易获得也具有同等的重要性^[4]。考虑到高强度铝合金在中小型水下机器人框架和耐压壳体制作中的广泛应用, 本文中的耐压壳体采用 Mg-Al-Si 系热处理强化铝合金 6A02 加工制造。

1.3 筒体的设计计算

1.3.1 筒体壁厚设计

根据耐压水密电子舱的使用条件及内部工控机、电化学在线测试仪和电源的尺寸规格, 本文筒体

收稿日期: 2012-10-15; 修回日期: 2013-03-01

基金项目: 山东省科技发展计划项目(2008GG10005015); 中央高校基本科研费用专项资金资助项目

作者简介: 李强(1988-), 男, 硕士研究生, 研究方向为腐蚀与防护, 电话: 0532-85808602, E-mail: 06321q@163.com; 李焰(1972-), 通信作者, 电话: 0532-85808602, E-mail: yanlee@upc.edu.cn

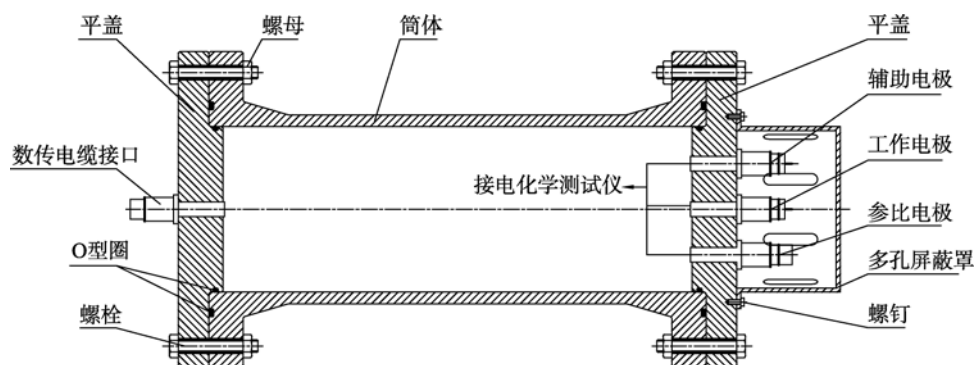


图1 水密电子舱壳体结构

Fig. 1 Shell structure of the watertight electronic cabin

的设计要求为:

(1) 耐压水密电子舱的工作深度为 300 m, 选取安全系数 $\xi=1.5^{[4]}$, 设计压力 $p_c=4.635$ MPa;

(2) 工作温度为 $6\text{ }^{\circ}\text{C}^{[6]}$;

(3) 设计筒体长度 $L=600$ mm, 内径 $D_i=200$ mm。

深海条件下使用的耐压水密电子舱属于外压容器, 其设计方法有解析法和图算法。由于解析法需反复试算, 较为繁琐^[7], 因此, 本文采用规范中推荐的图算法进行设计。

由于筒体外径 D_o 与筒体有效壁厚 δ_e 的比值介于 4.0 和 20 之间, 属厚壁圆筒, 故需同时考虑失稳和强度失效^[8]。其计算步骤如下:

a) 假设名义壁厚 δ_n , 算出 δ_e , 定出 L/D_o 和 D_o/δ_e 。

b) 在外压或轴向受压圆筒几何参数计算图的左方找到 L/D_o 值, 过此点沿水平方向右移与 D_o/δ_e 线相交。

c) 过此交点沿垂直方向下移, 在图的下方得到系数 A 。

d) 按所选材料选用圆筒外压计算图^[6A02], 在图的下方找到系数 A 。A 值落在设计温度下材料线的右方, 过此点垂直上移, 与设计温度下材料线相交, 再过此交点水平方向与纵轴相交得到系数 B 。

e) 按式(1)、式(2)计算 $[p]_1$ 和 $[p]_2$, 取 $[p]_1$ 和 $[p]_2$ 中的较小值为许用外压力 $[p]$ 。

$$[p]_1 = \left[\frac{2.25}{D_o / \delta_e} - 0.0625 \right] B \quad (1)$$

$$[p]_2 = \frac{2\sigma_o}{D_o / \delta_e} \left[1 - \frac{1}{D_o / \delta_e} \right] \quad (2)$$

式中: σ_o —应力, 取 $\sigma_o = 2[\sigma]^t$ 和 $\sigma_o = 0.9\sigma_{p0.2}^t$ 两值之间的较小值。

f) $[p]$ 应大于或等于 p_c , 否则须再假设名义厚度

δ_n , 重复上述计算步骤直到 $[p]$ 大于或接近 p_c 为止。

由于水密电子舱体由铝合金棒材经锻造、切削加工而成, 如保证加工精度则有筒壁厚度负偏差 $C_1=0$; 因水密电子舱非连续工作, 且 6A02 经表面防腐处理后可耐海水腐蚀, 故取腐蚀裕量 $C_2=0$ 。查得设计温度下 6A02 的许用应力 $[\sigma]^t=73$ MPa, $\sigma_{p0.2}^t=230$ MPa^[8], 计算得筒体名义厚度 $\delta_n=\delta_e+C_1+C_2=\delta_e=15$ mm, 故筒体外径 $D_o=230$ mm。

1.3.2 筒体法兰设计

本文中筒体法兰虽属外压法兰, 但可按内压法兰进行设计^[9]。为简化计算、降低成本、增加互换性, 在实际使用时, 尽可能选用标准法兰^[7]。由于筒体法兰和筒壁可由棒材整体加工出来, 无需额外的焊接等工序, 因此本文中筒体法兰可按整体法兰设计选用。由文献^[10]查表得法兰外直径 $D=381$ mm, 螺栓孔中心圆直径 $D_K=330.2$ mm, 法兰厚 $C=41.3$ mm, 法兰密封面取全平面型式, 如图 2 所示。

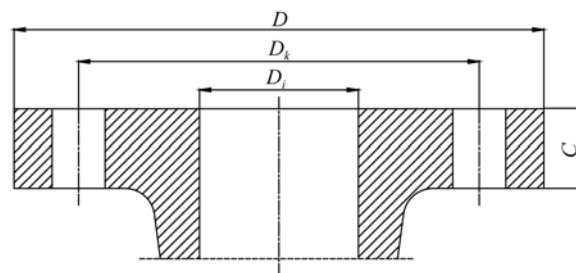


图2 法兰结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the flange

1.4 平盖设计

1.4.1 厚度计算

圆形平盖厚度按式(3)计算^[9]:

$$\delta_p = D_c \sqrt{\frac{K p_c}{[\sigma]^t \varphi}} \quad (3)$$

式中: δ_p —平盖计算厚度, mm; K —结构特征系数, 对圆形平盖 $K=0.25$; D_c —平盖计算直径, mm; φ —焊接接头系数, 这里不存在焊缝, 取 $\varphi=1.0$ 。

计算得到平盖的计算厚度 $\delta_p=41.6$ mm, 因平盖上开有安装水密接插件的螺纹孔, 需进行补强计算。

1.4.2 补强计算

采用增加平盖厚度的方法进行补强, 按下式计算削弱系数^[9], 以确定平盖所需厚度:

$$v = \frac{D_c - \sum b}{D_c} \quad (4)$$

式中: v —削弱系数; D_c —平盖计算直径; $\sum b$ —平盖危险径向截面上各开孔宽度之总和, 其值不得超过 $D_c/2$, 任意相邻两孔中心距不得小于两孔平均直径的 1.5 倍。

选用的水密接插件螺纹孔直径为 20 mm, 电极系统水密接插件开孔宽度之和满足前述要求, 计算得到平盖厚度 δ_p 为 46.0 mm。另外, 应密封和加工需要, 实际取平盖厚度为 54 mm, 且两端平盖厚度相同。

1.5 舱体密封结构设计

密封结构是耐压壳体的重要组成部分, 整个耐压水密电子舱在深海环境中的可靠性取决于密封结构的工作能力。出于舱内电化学测试仪等设备检修的需要, 常常需要打开耐压壳体的平板法兰盖, 因此法兰盖的密封结构不宜太复杂。因此, 本文采用水下机器人耐压壳体常用的橡胶 O 型密封圈作为密封材料, 这种密封具有以下诸多优点^[11]: ①动、静密封两用、密封性好、寿命长; ②体积小、重量轻、成本低、结构简单、装卸方便; ③具有自动双向作用密封功能; ④适用范围广, 对温度和压力的适应性好。

具体的密封结构如图 3 所示。在筒体法兰端面上开设沟槽装入 O 型圈, 在螺栓紧固作用下与端盖实现轴向密封, 且密封性能随海水静压力的增大而提高; 同时, 在法兰盖伸入筒体部分开设沟槽装入 O 型圈, 可以实现径向密封。为了实现较高的使用寿命和可靠的密封性, 应合理的选择 O 型圈、开设适宜的密封沟槽, 以使 O 型圈的拉伸量在 1.010 左右, 压缩率介于 10%~15%之间^[12]。

1.6 舱体表面处理

为了防止仪器舱表面受海水腐蚀, 延长其使用寿命, 表面处理技术也是本设计中非常重要的一环。

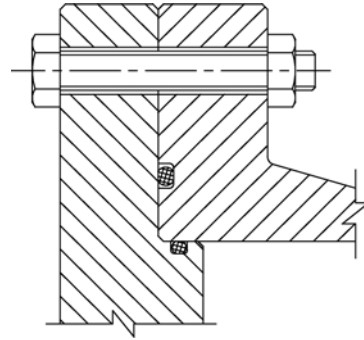


图 3 密封结构局部视图

Fig. 3 Sectional view of the seal constitution

研究^[13]表明, 经阳极氧化表面处理的铝合金在深海环境下的耐蚀性优于标准处理和化学铣切的耐蚀性。因此, 本文采用硬质阳极氧化^[14]来对舱体材料进行防腐蚀处理, 其氧化膜厚度 $\geq 25 \mu\text{m}$ 。经表面处理后, 仪器舱在硬度、耐磨性、结合强度、滑动性能、电穿透强度以及耐腐蚀性等性能方面都能得到优化^[15], 满足深海工作要求。

1.7 可靠性验证

外压容器的液压试验公式为^[8]:

$$p_T = 1.25 p \quad (5)$$

并按下式校核圆筒应力 σ_T :

$$\sigma_T = \frac{p_T (D_i + \delta_e)}{2 \delta_e} \quad (6)$$

且应满足:

$$\sigma_T \leq 0.9 \varphi \sigma_{p0.2} \quad (7)$$

式中: p_T —试验压力, MPa; p —设计压力, MPa; $\sigma_{p0.2}$ —圆筒材料在试验温度下的规定非比例伸长应力, MPa。

按 300 m 水深计算, 试验水压 $p_T=5.8$ MPa, 而该压力下本文设计的水密电子舱的圆筒应力 $\sigma_T=41.6$ MPa, 满足 $\sigma_T \leq 0.9 \varphi \sigma_{p0.2}=207$ MPa 的液压试验条件, 因此水密电子舱的设计满足强度和耐压要求。此外, 由文献^[11]等案例的成功经验可知, 本文的 O 型圈密封设计完全可以满足设计条件下的水密要求。

2 开放式电解池的设计

2.1 腐蚀传感器的设计

电化学方法不但可以提供丰富的界面微观作用的信息, 并且它的快速、原位、实时、连续测量的优点^[16]也是其它方法难以做到的, 所以它是研究材料

深海腐蚀行为、机制及其保护方法的主要手段。本文中腐蚀传感器采用电化学测试常用的三电极体系,并制作成水密插接件形式,可通过平盖上的螺纹孔直接安装在舱体上,电极工作面均暴露在舱体外部,工作时与海水直接接触,信号则经电极引线接入舱体内部的电化学测试仪。其中,参比电极参照文献[17]进行设计,采用全固态银/氯化银电极或高纯锌做参比电极芯,并加装多孔陶瓷作为保护;辅助电极及工作电极则是在参比电极结构的基础上,采用不锈钢及待测金属电极来替换参比电极芯及多孔陶瓷。工作电极位于平盖的中央,参比电极和辅助电极在工作电极周边关于工作电极呈周向对称分布。在需多次间歇作业时,可根据测试需要更换不同的工作电极,而无须拆装水密电子舱,具有操作方便的特点。

2.2 开放式电解池设计

深海条件下的在线腐蚀测试,需保证电极系统与腐蚀介质的良好接触和对环境条件的及时响应,因此,本文设计了如图4所示多孔屏蔽罩,与插接件式电极系统共同构成开放式电解池。开放性要求通过薄壁电解池开槽来实现,以确保电解池内外海水性质的一致性,满足在线测试的要求;同时,在电解池的内、外壁面涂装油漆,用绝缘壁的屏蔽作用将电流限制在电解池内,从辅助电极到工作电极的局部区域内可认为电流分布是均匀的^[17];此外,安装多孔屏蔽罩还可以保护电极系统不受异物损坏。

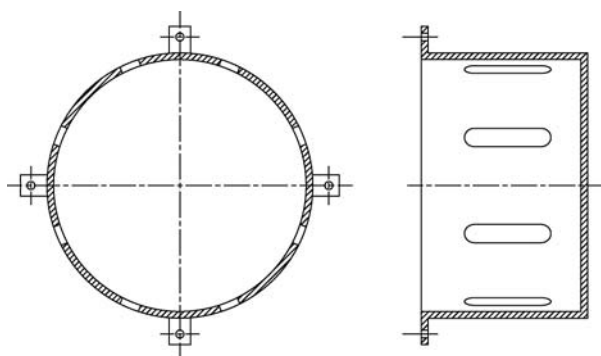


图4 开放式电解池罩示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the open-shielded case

3 测试方法

水密电子舱内电化学测试仪器包括开路电位监测仪、动电位扫描仪和频率响应分析仪等三种虚拟仪器软件,由工控机来控制测试过程。现场测试时,

将耐压水密电子舱安装到ROV上,并通过脐带电缆供电及建立数据链路;首先将预制的待测电极插接件安装在工作电极插座上,设定ROV的工作水深以及多参数水质探头开始工作的时间;当ROV下水、到达指定水深后作水平机动,通过ADCP(高级数据通信协议)装置测定自身运动速度及海水的流速,并实时存储数据,同时通过脐带电缆触发腐蚀电化学测试系统进行开路电位、电化学阻抗、极化曲线等电化学测试;而现场的海水水质,如温度、盐度、溶解氧、pH、氧化还原电位等腐蚀过程的影响因素,则由ROV上集成的多参数水质探头进行自容式实时测试获得。将获取的海洋工程材料在深海环境中的极化曲线、电化学阻抗谱及相应的反应动力学参数同现场水质参数相关联,可掌握各种材料在海洋环境中的腐蚀行为与规律,可为固定或移动式海洋钢结构的设计、选材、防护以及新材料的开发提供基础数据和科学依据。

4 结语

(1) 本文成功设计了一种可在水下300 m水深条件下进行腐蚀电化学在线检测作业的水密电子舱,包括高强度铝合金耐压壳体 and 开放式电解池两部分。耐压壳体采用双层O型圈进行密封,并经硬质阳极氧化处理提高耐海水腐蚀性能。开放式电解池由三电极系统和多孔屏蔽罩组成,电极系统采用便于更换的水密插接件型式,多孔屏蔽罩既可保证电极系统与海水的充分接触,又能保护电极系统免遭损坏。

(2) 设计的水密电子舱具有以下特点: 1) 结构简单,加工制造容易,成本较低; 2) 体积小,质量轻,便于搬运; 3) 强度高,稳定性好,密封可靠; 4) 耐海水腐蚀性能强; 5) 安装、维护容易。

参考文献:

- [1] 江伟钰, 陈方林. 深海底资源开发与可持续发展[J]. 海洋科学, 2000, 24(1): 51-52.
- [2] 许立坤, 李文军, 陈光章. 深海腐蚀试验技术[J]. 海洋科学, 2005, 29(7): 1-3.
- [3] SHANG Gao-feng, ZHANG Ai-feng, WAN Zheng-quan. Optimum Design of Cylindrical Shells under External Hydrostatic Pressure[J]. China Ship Scientific Research Center, 2010, 14(12): 211-222.
- [4] 蒋新松, 封锡盛, 王棣棠. 水下机器人[M]. 辽宁: 辽宁科学技术出版社, 2000.
- [5] 陆蓓, 刘涛, 崔维成. 深海载人潜水器耐压球壳极限

- 强度研究[J]. 船舶力学, 2004, 8(1): 51-58.
- [6] 郭为民, 李文军, 陈光章. 材料深海环境腐蚀试验[J]. 装备环境工程, 2006, 3(1): 10-15.
- [7] 郑津洋, 董其伍, 桑芝富. 过程设备设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [8] JB/T 4734—2002, 铝制焊接容器[S].
- [9] GB 150-1998, 钢制压力容器[S].
- [10] BS EN 1759—4: 2003, Flanges and their joint - Circular flanges for pipes, valves, fitting and accessories, class designated-Part 4: Aluminium alloy flanges[S].
- [11] 于彦江, 张志刚, 徐行, 等. 深海耐压仪器舱的设计[J]. 海洋技术, 2001, 29(2): 33-35.
- [12] 赵立新, 丁筱玲, 张业民, 等. O 型密封圈功能的充分发挥[J]. 排灌机械, 2000, 18(2): 32-34.
- [13] 赵月红, 林乐耘. 不同加工及表面处理状态 LF6 铝镁合金的深海腐蚀行为[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(1): 27-30.
- [14] 崔昌军, 彭乔. 铝及铝合金的阳极氧化研究综述[J]. 全面腐蚀控制, 2002, 16(6): 12-17.
- [15] 苏纪文, 李琪敏. 铝及铝合金硬质阳极氧化[J]. 四川兵工学报, 2002, 23(3): 31-32.
- [16] Bosch R W, Hubrecht J, Bogaerts W F, et al. Electrochemical frequency modulation: A new electrochemical technique for online corrosion monitoring [J]. Corrosion, 2001, 57(1): 60-70.
- [17] 中国海洋石油总公司. 水下阴极保护电场检测用参比电极接插件: 中国, 200620085441.7[P]. 2008-01-16.
- [18] 万小山, 田斌, 宋诗哲. 水下钢铁构筑物腐蚀监/检测电化学传感系统研制[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2001, 21(3): 182-183.

A Design of Watertight Electronic Cabin for *in-situ* Electrochemical Measurement under Deep Sea Condition

Li Qiang¹, Li Yan^{1, 2}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China; 2. Institute Of Oceanology, Chinese Academy of Science, Qingdao 266071, China)

Received: Oct., 15, 2012

Key words: deep sea corrosion measurement; compressive vessel; open-shielded electrolytic cell; electrode connector; electrochemical measurement

Abstract: A watertight electronic cabin that can be used to conduct *in-situ* electrochemical corrosion measurement under deep sea condition up to 300 meter was built. The main part of the cabin is a compressive watertight vessel; the electrode connector system and an open electrolytic cell are both integrated outside the vessel. The compressive vessel consists of a cylinder and two enhanced flat blind flanges, and the vessel can meet the required strength, seal and corrosion resistance under the design condition. With the designed watertight connector, three-electrode system is installed on an enhanced flat blind flange. The open-shielded electrolytic cell is made up of the electrode system and an outer porous cage to carry out *in-situ* electrochemical test under deep sea water.

(本文编辑: 康亦兼)