一种深海热液原位探测设备供能装置的设计

吴怀超[1]，谭春阳[2]，金 波[2]，杨灿军[2]，陈 鹰[2]

(1. 贵州大学 机械工程学院，贵州 贵阳 550003；2. 浙江大学 流体传动及控制国家重点实验室，浙江 杭州 310027)

摘要：为了解决深海热液原位探测设备的能量供给问题，设计了一种实用的供能装置。该供能装置采用了一种定制的高能量密度电池，电池组的容量达 31.5 Ah，最大输出电压为 12 V。供能装置的耐压壳体采用了压力容器的设计原则进行设计，其最大承受压力达 70 MPa。放电实验表明该供能装置具有较稳定的放电电压；海试实验表明该供能装置能用于深海高压环境。

关键词：深海热液；原位探测；压力容器；供能装置
中图分类号：P751　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-3096(2011)02-0082-04

深海热液喷口及其周围的独特生命形式，是我们认识地球内部结构与组成的一个重要窗口[1]，也是研究地球早期生命起源的天然实验室[2]。自 20 世纪 80 年代以来，人类通过各种探测方式获得了大量有关深海热液的信息。目前，在深海热液的几种探测方式中，原位探测是很多科学家大力推崇的方法，一方面是因为用于原位探测的设备不仅能监测热液区域的空间和瞬间连续变化的信息，真实反映热液活动演化的动态体系，而且具有操作简便、灵敏度高和反应速率高等优点[3]；另一方面，将现代数据存储和通信技术应用于深海原位探测，能达到在线、实时探测的目的[4]。深海热液原位探测涉及多层面的关键技术，供能技术是其一。

目前，大多数深海热液原位探测设备都是采取自带电池的方式来供能，然而，目前市场上电池的能量密度很难满足深海热液原位探测设备的用电需求。另一方面，深海热液环境是一种极端的环境，将陆地用电池带到此种环境下进行供电还需要解决一些技术问题，如耐压、可靠性和放电稳定性等。本论文从实用的角度出发，设计了一种面向深海热液原位探测的供能装置，该供能装置的电池容量达 31.5 Ah，最大输出电压为 12 V。整个供能装置具有结构紧凑、功能集中、易于安装、可重复使用的特点，可作为一般深海热液原位探测设备的通用供能装置。

1 供能装置的电池选择

深海热液原位探测设备往往要借助于载人深潜器运送到海底，在海底工作时，这些设备需要具备较高的自动化和智能化以适应在海底的全自动化工作，这就在客观上要求深海热液原位探测设备的供能装置的可靠性和安全性要极高，同时，要求供能装置的比能量要尽可能大，否则，一旦系统的供电出现问题，则整个探测设备便处于“瘫痪”状态。另一方面，从成本和环保的角度来考虑，深海热液原位探测设备的供能装置应具备可重复使用的特点，这就要求供能装置所用电池应为充电电池。

目前，常用的充电电池有铅酸电池、镍镉电池、镍氢电池、锂电池。其中，铅酸电池价格低廉，但其比能量较低，对环境腐蚀性强；镍镉电池自放电率较小，价格相对便宜，但容易产生记忆效应，其比能量一般；镍氢电池的很多特性与镍镉电池相同，但性能优于镍镉电池，其优点是单体电池容量大、内阻低、基本没有记忆效应，缺点是自放电率较高；锂电池是目前比较先进的电池，其单体电池电压高，比能量大，且无记忆效应，但其价格昂贵，且存在安全隐患。深海热液环境是一个极端的环境，选择充电电池时考虑的重点是安全、可靠、比能量高以及对环境的污染小，通过对上述各类充电电池的比较与分析，深海热液原位探测设备供能装置的电池选择镍氢电池较为合适，这是因为镍氢电池的安全系数大，比能量较高，对深海海底环境影响较小。

收稿日期：2009-11-02；修回日期：2010-11-12
基金项目：国家自然科学基金重点项目(40637037)
作者简介：吴怀超(1975-)，男，湖北红安人，副教授，博士，主要从事深海机电装备技术及电液控制技术的研究，电话：0851-4119759，E-mail: magoubs@sina.com

然而，市场上目前出售的镍氢电池的容量远远不能满足深海热液原位探测设备的用电需求，以使用最广泛的 5 号(AA 型)电池为例，单节电池的容量仅 1 000~1 300 mAh。为此，特定制了一款镍氢可充电电池 Ni-MH C4500 mAh。该款电池具有很大的能量密度比，每节电池的额定容量为 4 500 mAh，标准电压为 1.2 V，直径为 25.2 mm，高度为 50.0 mm，质量大约为 80 g，使用温度为–20~60 ºC。该款电池以 450 mA 的标准充电需 16 h；以 900 mA 的标准放电可至 1.0 V/只，且其放电时间达 5 h 以上。

2 供能装置的结构设计

2.1 供能装置的整体结构

供能装置的供电电压设计为 12 V，故采用 10 节定制的电池串联成一组，然后 7 组电池并联，总共 70 节电池进行供电。为了保证供能装置供电的可靠性，特将 7 组电池封装在一个电池筒里，为了使之能在海底提供电能，还需要将装满电池的电池筒装入一个耐压腔体中，整个供能装置的装配图如图 1 所示。由图 1 可以看出，此供能装置的腔盖上装有一根 2 芯水密接插件，它连接供能装置和用电装备，起输送电能的作用。

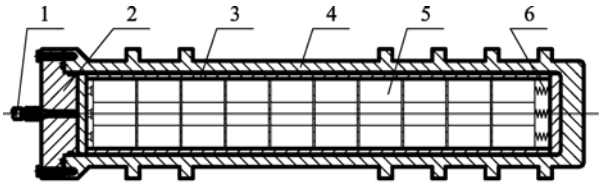

图 1 供能装置的装配图

Fig. 1 Assembly drawing of the energy supplying device

2.2 供能装置耐压腔体的设计

如图 1 所示，此供能装置之所以能用于深海热液环境下，起关键作用是封装电池筒的耐压腔体，因而，此耐压腔体的设计至关重要。耐压腔体的设计包括两方面的内容：一是材料的选择；二是耐压设计。

深海热液环境是一个高压、高温和腐蚀的环境，在此种恶劣环境下进行原位探测，各种装备的材料选择是首要考虑的问题。目前，深海热液原位探测设备的常用材料主要是钛合金和不锈钢，此两种材料都具有强度高，屈强比大，耐腐蚀性能强等特点，但钛合金的密度小得多，其价格也贵得多[5]。考虑到重量和体积等因素，图 1 所示供能装置的耐压腔体拟选用钛合金 TC4。

图 1 所示供能装置的设计压力为 70 MPa，而压力范围在 10 MPa≤P≤100 MPa 的压力容器属于高压容器[6]，因而，图 1 所示供能装置应按照高压容器的设计原则进行耐压设计。高压容器的失效方式一般有两种：一种是因强度不足而导致的破坏，另一种是因刚度不足而导致丧失稳定性。所以，高压容器的设计包括强度计算及稳定性校核两方面的内容[7]。

2.2.1 供能装置耐压腔体的强度计算

以弹性失效准则为基础的筒壁设计，根据所用强度理论的不同，有不同的设计公式。我国所采用的失效准则为弹性失效准则，采用的计算公式为中径公式[7]。

根据中径公式，当 $p \leqslant 0.4[\sigma]\varphi$ 时，圆筒腔体的壁厚 S 计算公式为：

$$S = \frac{pD_{\mathrm{i}}}{2[\sigma]\varphi - p} + C \tag{1}$$

式中，S 为圆筒腔体壁厚(mm)；p 为设计压力(MPa)；D_{i} 为筒体腔体内径(mm)；$[\sigma]$为设计温度下的许用应力(MPa)；φ为焊缝系数，当不存在焊缝时，取 1；C 为圆筒腔体壁厚附加量(mm)。

圆筒腔体的腔盖属于一个平封头；圆筒腔体的底部相当于一个与圆筒腔体加工成整体的平盖。当开孔直径 $d \leq 0.5\,D_{\mathrm{i}}$ 时，它们的厚度的计算公式为[7]：

$$S = D_{\mathrm{c}}\sqrt{\frac{Kp}{[\sigma]\nu\varphi}} + C \tag{2}$$

式中，D_{c} 为圆筒腔体的计算直径；ν 为开孔削弱系数，且有

$$\nu = \frac{D_{\mathrm{c}} - \sum d_{\mathrm{i}}}{D_{\mathrm{c}}} \tag{3}$$

式中，$\sum d_{\mathrm{i}}$ 为腔盖或底部直径截面上开孔直径(不包括螺栓连接时的螺栓孔)之和，若腔盖上没有开孔，或者是用螺栓连接时的螺栓孔，$\sum d_{\mathrm{i}}$ =0；K 为结构特征系数，对于螺栓连接，K=0.25；若腔体的底部与筒体成一体时，K 按如下公式进行计算[8]：

$$K = \frac{1}{4}\left[1 - \frac{r}{D_{\mathrm{c}}}\left(1 - \frac{2r}{D_{\mathrm{c}}}\right)\right]^2, \text{ 且 } K \geq 0.16 \tag{4}$$

式中，r 为圆筒腔体底部与腔体内部的过渡圆弧的半径(mm)。

根据定制电池的尺寸，图 1 所示的供能装置耐压腔体的长度为 560 mm，内径为 92 mm。钛合金 TC4 在室温时的一些力学性能参数为[9]：抗拉强度

$\sigma_b = 902$ MPa; 屈服强度 $\sigma_{0.2} = 824$ MPa; 弹性模量 E=116 GPa; 泊松比μ=0.35。将这些常量代入上述各公式, 可计算出供能装置耐压腔体的各部分厚度尺寸: 腔体壁厚为 13 mm, 腔盖厚度为 23 mm, 底部厚度为 22 mm。

2.2.2 供能装置耐压腔体的稳定性校核

对于高压容器的设计, 除了强度计算外; 还应进行稳定性校核, 以检验其是否会出现刚度失效。而要进行稳定性校核, 先要判断是属于长圆筒还是短圆筒, 然后再采用相应的公式进行计算。

长圆筒与短圆筒的临界长度 L_{cr} 计算公式为[7]:

$$L_{cr} = 1.295D(1-\mu^2)\sqrt{D/S_0} \qquad (5)$$

式中, D 为圆筒中径(mm); μ为材料的泊松比; S_0 为筒体的计算壁厚(mm)。

当实际长度 $L > L_{cr}$ 时, 属于长圆筒; 当 $L < L_{cr}$ 时, 属于短圆筒。将钛合金 TC4 在室温时的力学参数和供能装置耐压腔体的基本尺寸以及由上面强度公式计算得出的厚度值代入式(5), 可算出临界长度 $L_{cr} \approx 351$ mm, 而 $L = 560$ mm, 故供能装置耐压腔体属于长圆筒, 因而, 应该按照长圆筒的校核公式进行稳定性校核。

根据勃莱斯公式(Bresse), 长圆筒的校核公式为[7]:

$$P \leqslant [P] = \frac{p_{cr}}{m} = \frac{2E}{m(1-\mu^2)}\left(\frac{S_0}{D}\right)^3 \qquad (6)$$

式中, P 为设计压力(MPa); $[P]$ 为许用压力(MPa); p_{cr} 为临界压力(MPa); m 为安全系数; E 为材料在设计温度下的弹性模量(MPa)。

将钛合金 TC4 在室温时的力学参数和供能装置耐压腔体的基本尺寸以及由上面强度公式计算得出的厚度值代入式(6), 当安全系数 m 取 3 时, 可算出许用压力 $[P] \approx 136$ MPa, 远大于设计压力 70 MPa, 表明此耐压腔体稳定性合格, 不会出现刚度失效, 因而, 通过强度计算得出的供能装置耐压腔体的厚度值合理。

2.3 供能装置的充电

图 1 所示的深海热液原位探测设备的供能装置能提供的电压达 12 V, 电池容量达 31.5 Ah, 除此之外, 通过此供能装置还能对封装在其中的 70 节充电电池进行充电。当需要充电时, 拧开图 1 所示供能装置中腔盖上的 4 个螺钉, 取出装在耐压腔体中的电池筒, 然后将电池的正负接线接在在市场上购买的小型直流电源上即可对之进行充电, 在充电的过程中, 调节直流电源的电流旋钮, 将充电电流调节为此款电池的标准充电电流 450 mA, 以此标准电流进行充电 16 h 便可完成充电。

3 实验测试

为了验证上述设计的供能装置的供电能力, 特对安装好后的供能装置的放电能力进行了测试, 图 2 是该供能装置的放电曲线图。由图 2 可以看出, 该供能装置具有较稳定的放电电压; 以恒定的 900 mA 放电, 能够连续提供近 35 h 10 V 以上电能, 因而其容量可达 31.5 Ah, 此供电能力完全能满足一般深海热液原位探测设备的用电需求。当供能装置放电完毕, 再对之进行充电 16 h(充电电流为 450 mA), 充电完毕, 再对之进行放电测试, 测试结果与图 2 的放电曲线几乎相同, 从而说明此供能装置能重复使用, 可满足深海热液原位探测设备多次海试的要求。图 1 所示供能装置放电截止电压为 10 V, 标准放电电流为 900 mA, 放电电流不宜超过 4 500 mA, 且以 4 500 mA 放电时, 最多允许重复使用 3 次, 且低温放电性能较好, 在 0 ℃±2 ℃ 时, 以 900 mA 的标准放电电流放电至 10 V 时, 放电时间可达 28 h。

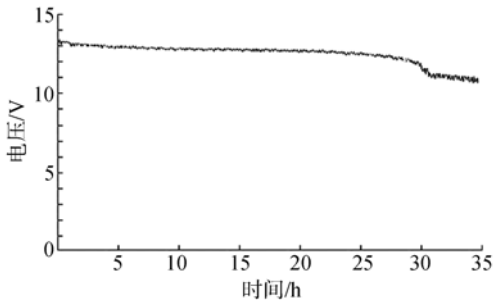

图 2 供能装置的放电曲线图

Fig. 2 Discharge curve of the energy supplying device

为了验证该供能装置能否真正应用于海底, 该供能装置被安装在深海热液 pH 原位探测器上, 由美国用于深海科考的深潜器“Alvin”号带到深达 2 505 m 的海底工作, 如图 3 所示。此次海试测得了深海热液经过校正的 pH, 表明该探测器的供能装置在海底发挥了重要的作用。通过此次实际意义上的海试, 证明了本文所设计的供能装置设计合理, 其耐压腔体能承受海底海水的高压, 其供电能力能满足探测器的用电需求。

4 结论

深海供能技术一直是人们关注的问题, 本文从

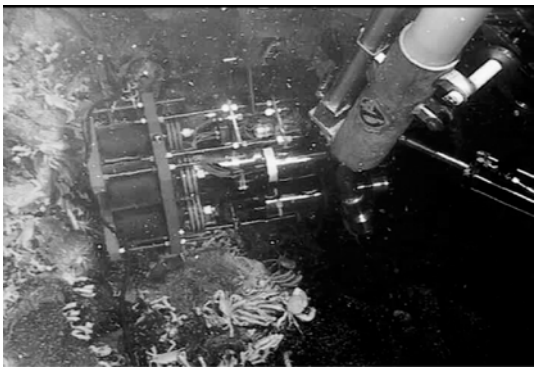

图 3　Alvin 在海底布放系统

Fig. 3　Deploying the system by Alvin on the seafloor

实用的角度出发，设计了一种简易可靠的可重复使用的面向深海热液原位探测的供能装置，该供能装置的容量达 31.5 Ah，最大输出电压为 12 V，最大承受压力为 70 MPa，具有结构紧凑、功能集中、易于安装、充电方便的特点。更为重要的是，该供能装置经受住了实际的海试实验的考验，可用作一般深海热液原位探测设备的通用供能装置。

参考文献:

[1] 栾锡武. 现代海底热液活动区的分布与构造环境分析[J]. 地球科学进展, 2004, 19(6): 931-938.

[2] McClendon J H. The origin of life [J]. Earth-Science Reviews, 1999, 47: 71-93.

[3] 曹志敏，安伟，于新生，等. 现代海底热液活动异常条件探测关键技术研究[J]. 高技术通讯, 2006, 16(5): 545-550.

[4] 陈鹰，杨灿军，顾临怡，等. 基于载人深潜器的深海资源勘探作业技术研究[J]. 机械工程学报，2003, 39(11): 38-42.

[5] 黄嘉琥. 压力容器材料实用手册——特种材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 1994.

[6] 薛杨声，赵纪兰. 高压装置及其设计原理[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1992.

[7] 丁伯民，蔡仁良. 压力容器设计——原理及工程应用[M]. 北京: 中国石化出版社, 1992.

[8] 李景辰，冯铁中，沈行道，等. 压力容器基础知识[M]. 北京: 劳动人事出版社, 1986.

[9] 董大勤，袁凤隐. 压力容器与化工设备实用手册(上册)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.

Design of an energy supplying device for equipments for in-situ detection of deep-sea hydrothermal fluid

WU Huai-chao[1], TAN Chun-yang[2], JIN Bo[2], YANG Can-jun[2], CHEN Ying[2]

(1. College of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550003, China; 2. The State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Received: Nov., 2, 2009

Key words: deep-sea hydrothermal fluid; in-situ detection; pressure vessel; energy supplying device

Abstract: In order to solve the energy supplying problem of in-situ detection equipment for deep-sea hydrothermal fluid, a practical energy supplying device was designed. A custom-made battery with high energy density was used in the energy supplying device. The capacity of the assembled battery reached 31.5Ah, and its maximal output voltage was 12V. Pressure casing of the energy supplying device was designed according to the design principle of pressure vessel, with a maximal load pressure of 70 MPa. The discharge experiment showed that the discharge voltage of the energy supplying device was stable; and the sea trial experiment confirmed that the energy supplying device functioned properly in deep-sea high pressure environment.

(本文编辑: 刘珊珊)