

一种新型深海微生物多级膜取样系统^{*}

李 玮, 顾临怡^{*}, 吴新然, 陈家旺

(浙江大学 流体传动与控制国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对现有微生物取样系统存在的样品杂质含量高、微生物纯度低的问题,介绍了一种新型深海微生物多级膜取样系统,设计了一种多级膜过滤系统,能有效剔除杂质。使用三柱塞海水泵抽取水样,可伸缩的采集头设计能够实现对精确位置的采样,温度测量头可以获取采样点的温度信息。整个系统采用了模块化设计,特别适宜于科考实验中水下运载器的搭载运输。在 2010 年 10 月南海实验中,整套系统运行正常,实验结果表明系统达到了提高样品纯度的设计目的。

关键词:深海微生物;保压取样;蓄能器;压力补偿

中图分类号:TH122;TH3;TP271

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2011)06-0663-05

New type of deep-sea microorganism sampler system with multi-layer membranes

LI Wei, GU Lin-yi, WU Xin-ran, CHEN Jia-wang

(State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The present deep-sea microorganism sampler is defective in sample's purity. Aiming at improving the purity of samples, a new type of deep-sea microorganism sampler system was introduced, which features multi-layer membranes. The system also included a telescopic sampling tube set which was very helpful in precise position sampling, a seawater resistant plunger pump and a temperature measurement device. All parts of the system were modular-designed, which were very friendly for using in underwater vehicles. The system was tested in the South China Sea trial in October, 2010. The experimental results indicate that the sampler system functions normally and meets the design requirements.

Key words: deep-sea microorganism; pressure maintaining sampling; accumulator; pressure compensation

0 引 言

海洋微生物是指分布在海洋中的个体微小、形态结构简单的单细胞或多细胞生物。作为食物链最底层的生物,它们为众多的海洋生物提供了庞大的食物营养来源,并在污染物分解、矿物形成等过程中扮演了极为重要的角色。海洋环境的特殊性,使得海洋微生物在长期的适应过程中具有了嗜压、嗜盐、低营养性、多形性等特点。相对于营养丰富、光照充足的浅海,深海的微生物活动并不十分剧烈,但从海面到海底淤泥都有微生物的存在。对深海微生物的研究不仅有助于了解生命的起源,而且可以了解生物在极端环境下的生活特性,有助

于对海洋生态系统加深了解和深海资源的开发^[1-3]。

1977 年 ALVIN 深潜器证实了深海微生物的存在,科学家们随之开始了深海微生物取样技术的研究。早期的深海微生物取样器由深海取水器发展而来,但由于深海微生物极低的浓度和极高的保压要求,其取样方法逐渐向着原位浓缩、无压力突变、保温保压的方向发展。现有的原位浓缩保压取样技术由于只进行一次过滤,存在着样品杂质含量高,微生物难以分离的缺点。

本研究设计了一种深海微生物多级膜取样系统,相比于已有的过滤浓缩取样装置,取样器部分采用了两级膜的过滤设计,能较好地剔除杂质,提高所采样品有效浓度。同时系统还配备了可伸缩的采集头以及

收稿日期:2010-11-26

基金项目:国家高技术研究发展计划(“863”计划)资助项目(2007AA091901)

作者简介:李 玮(1987-),男,陕西汉中,主要从事深海机电装备方面的研究. E-mail: lw87@zju.edu.cn

通信联系人:顾临怡,男,教授,博士生导师. E-mail: lygu@zju.edu.cn

温度测量头,满足了在热液口等复杂环境下的使用需要。2010 年秋经过大洋一号南海试航阶段的实验,该系统能够圆满完成设计使命。

1 系统原理与结构

系统总图如图 1 所示,该系统主要由 4 个部分组成:多级膜过滤保压取样器、三柱塞海水泵、伸缩式采集头,以及温度测量装置。

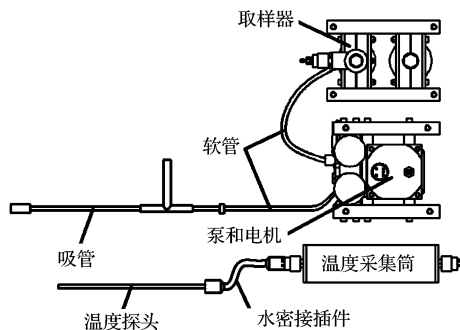


图 1 系统总图

多级膜取样器液压原理图如图 2 所示,系统的工作原理是:深海直流无刷电机带动三柱塞海水泵,泵的入口处连接采集头吸管,吸入的海水从泵的出口进入六通转接管。六通转接管的 5 个出口分别连接一组两级膜过滤保压筒,保压取样器共含有 5 组并联安装的两级膜过滤保压筒,每组保压筒都以单向阀作为进口,电磁单向阀作为出口,电磁阀直通海水。本研究通过控制电磁阀的开关来切换需要使用的过滤保压筒^[4]。另一个直流无刷电机带动的可伸缩采集头,可在工作时伸出采集头,取样结束后将采集头缩回。取样位置的温度信息通过温度测量探头感知,再由温度采集筒内的采样放大电路进行处理和上传。

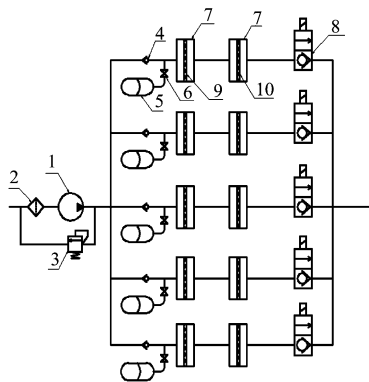


图 2 多级膜取样器液压原理图

1—三柱塞海水泵;2—过滤器;3—溢流阀;4—单向阀;
5—蓄能器;6—截止阀;7—保压筒;8—电磁单向阀;9—一级过滤膜($0.45\ \mu\text{m}$);10—二级过滤膜($0.22\ \mu\text{m}$)

1.1 多级膜过滤保压取样器

多级膜取样器如图 3 所示,多级膜过滤保压取样器包含 5 组多级膜过滤保压取样筒,每组过滤保压取样筒具有相同的结构,相互间作并联安装,每个取样筒内随海水通过方向依次放置两级过滤膜,第 1 级的孔径大于第 2 级的孔径,体积较大的杂质颗粒被第 1 级过滤膜滤掉,体积较小的海洋微生物则可通过第 1 级过滤膜,但无法穿过第 2 级,于是可在第 2 级过滤膜上取到纯度较高的海洋微生物^[5]。两级过滤膜之间连接有三通截止阀,截止阀留有一个可开闭的接口,可以用于样品的转移。

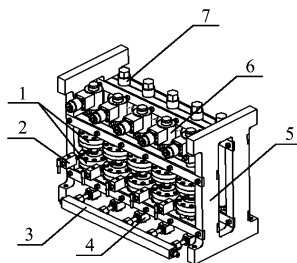


图 3 多级膜取样器

1—保压筒;2—截止阀;3—六通转接管;4—单向阀;5—支架;6—电磁单向阀;7—蓄能器

每组保压取样筒的进口处有一个单向阀,出口处有一个电磁单向阀,电磁单向阀打开时,进口处单向阀在泵出口压力下打开,海水开始通过保压取样筒过滤取样;电磁单向阀关闭时,流道被切断,对应的保压取样筒不再有海水通过,进口处的单向阀也复位关闭,取样筒内液体被密封起来,压力仍得到保持。

在取样回收过程中,外界压力变小,取样筒筒体会发生膨胀,加之装置本身不可避免地泄露,取样筒内的压力会有所下降,因而需要进行压力的补偿。在入口单向阀与取样筒之间加装蓄能器,蓄能器装在刚性的筒体内。在取样器下放前,根据预计取样深度给蓄能器预充一定压力的氮气,预充气压略低于取样海水压力,下放之后蓄能器刚性筒体受海水压缩轻微变形,所以蓄能器开启压力要比预充压力略高。取样时,取样筒与蓄能器筒相通,海水进入蓄能器筒,压缩蓄能器,内部气体压力与海水压力相等。在取样回收过程中,当取样筒内压力下降时,蓄能器通过一定程度的膨胀,挤出油液进入到保压筒内,可以对取样筒内损失的压力给予一定程度的补偿,实现保压^[6]。

1.2 伸缩式采集头

在实际取样过程中,为了实现对精确位置(如热液口)的取样工作,需要能活动的采集头。传统上,采

集头通过水下机械手进行操作移动,但水下机械手价格昂贵,且很多水下运载器及拖体上并未装备机械手,这就限制了取样器的搭载方式和使用范围。

为解决此问题,该取样系统中配置了可伸缩式采集头,如图4所示。采用深海直流无刷电机带动丝杆运动,并以导轨滑块导向的方式实现吸管的伸缩。吸管等滑动部件的重量所产生的弯矩,由导向结构来承载。系统共配置6根吸管,平面并联布置。每根吸管负责一个取样点的采集任务,要对多个取样点进行采样时,则分别使用不同的吸管,可以防止样品交叉污染。吸管通过软管接到海水柱塞泵的入口,柱塞泵的出口通过软管连接到六通转接管,接入过滤保压取样器。在取样工作完成后,还可收回采集头,方便保护和运载。

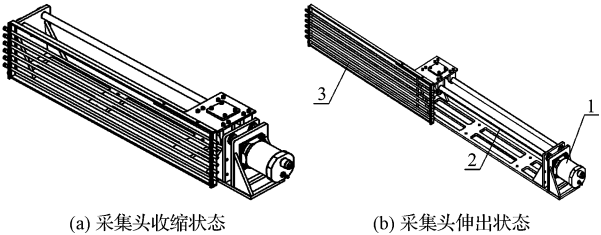


图4 伸缩式采集头

1—深海直流无刷电机;2—丝杆;3—采集头吸管

1.3 三柱塞海水泵

该取样系统使用一种深海压力平衡的海水柱塞泵,如图5所示。该柱塞泵为曲轴转动相位互成120°的三柱塞泵,由电机带动曲轴旋转,其曲轴箱一侧连通一个充油的压力补偿器。柱塞泵由深海直流无刷电机驱动,电机和泵都安装到材料为工程塑料的支架上。电机的额定转速为1 500 r/min,泵的额定输出流量为4 L/min,最大输出压力为10 MPa。

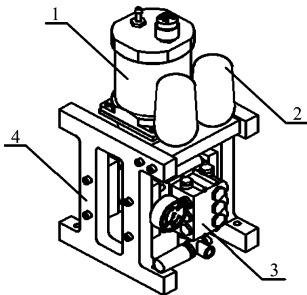


图5 三柱塞海水泵

1—深海直流无刷电机;2—压力补偿器;3—三柱塞海水泵;4—支架

由于柱塞泵的流量稳定、工作压力高,可以适应多级过滤膜的过滤系统,并且可以根据电机的转速和运转时间确定通过的流量,很好地满足了微生物取样系

统的要求。

1.4 温度测量装置

对于热液口等特殊海洋区域的微生物采样,需要知道取样点准确的温度、压力等环境信息,从而更准确地实施取样操作,分析取样结果。因此,该取样系统配置了温度测量装置,如图6所示。

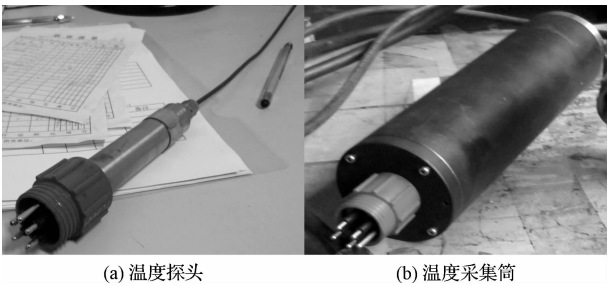


图6 温度测量装置

该装置包含一个温度探头和一个温度采集筒。温度探头内有一个测量温度用的热电偶和一个温度补偿热敏电阻,可以输出两路模拟量信号,信号经温度采集筒内的信号处理电路放大处理后,输出0~5 V直流电压,经A/D采样就可上传到上位机,显示当前采样点的温度值。温度探头和温度采集筒之间通过水密接插件相连。

2 关键部分设计计算

2.1 保压筒设计

取样器共包含5组相同结构的取样筒,每组取样筒都为两级膜过滤,每一级过滤膜都安装在如图7所示的保压筒内,保压筒之间通过管道串联,保压筒由上、下两块端盖通过螺钉连接组成,挡板之间通过O圈密封。过滤膜放置在布满细孔的挡板上,其边缘也通过O圈密封并压紧固定,使海水只能从滤膜经过,保证过滤效果。由于滤膜的安装,使得保压筒处的流道宽度很宽,上、下端盖受力极大,而且此处的受力变形也直接影响到样品保压效果,故需重点设计校对。

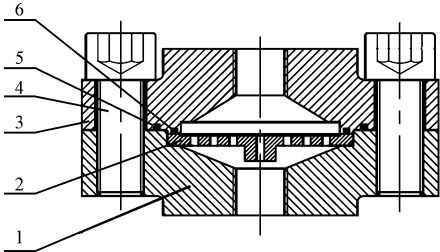


图7 取样器保压筒

1—下端盖;2—挡板;3—上端盖;4—螺钉;5—O型圈;6—O型圈

在本研究中,过滤膜尺寸 $\Phi = 47$ mm,工作压力 $P = 60$ MPa,材料选 0Cr17Ni4Cu4Nb,屈服强度 $\sigma_{0.2} = 725$ MPa,抗拉强度 $\sigma_b = 930$ MPa。

$\sigma_{0.2} = 725$ MPa,安全系数 $n_s = 1.6$,许用应力 $[\sigma_{0.2}] = \sigma_{0.2}/n_s = 453$ MPa。

$\sigma_b = 930$ MPa,安全系数 $n_s = 3$,许用应力 $[\sigma_b] = \sigma_b/n_s = 310$ MPa。

(1) 端盖厚度计算:

取端盖内径 $D = 45$ mm,则最小厚度:

$$S_{\min} = D \times \sqrt{0.31P/[\sigma_b]} = 11.02 \text{ mm} \quad (1)$$

取 $S = 12$ mm。

(2) 螺钉的抗拉校核:

受压面积:

$$S = \pi D^2/4 = 1.6 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \quad (2)$$

膨胀力:

$$F = S \times P = 95\,426 \text{ N} \quad (3)$$

笔者选用相同的材料做螺钉,选择 8 颗 M12 $\times$ 1.75 的螺钉,螺钉 $D_1 = 10.106$ mm, $D_2 = 10.863$ mm, $D = 12$ mm。

单颗螺钉受拉力:

$$F = 95\,426/8 \text{ N} = 11\,928 \text{ N} \quad (4)$$

$$\sigma = F/S = 4F/\pi D_1^2 = 149 \text{ MPa} < [\sigma_b] \quad (5)$$

(3) 端盖抗剪校核:

最薄弱处直径 52 mm,厚度 10.6 mm,则^[7]:

$$\tau = F/S = 55 \text{ MPa} < [\tau] \quad (6)$$

2.2 电磁单向阀设计

电磁单向阀如图 8 所示,为实现可靠密封,本研究对电磁单向阀进行了改进,在阀芯的锥面上增加了一个 O 形橡胶密封圈,阀套相应的地方也做成了圆锥面,锥度和阀芯的锥度相同,这样在阀芯压住阀套时,阀芯上的 O 形圈就会压在阀套的锥面上,形成类似于端面密封的密封形式,克服了以往单纯的金属与金属密封泄漏的问题,提高了阀的稳定性,降低了阀维修的难度。相应的入口单向阀也做了相同改进。

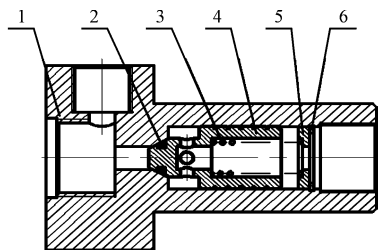


图 8 电磁单向阀

1—阀套;2—O 型圈;3—弹簧;4—阀芯;5—底座;6—孔用弹性挡圈

按设计要求,单向电磁阀的额定流量为 4 L/min,阀口通径取 $D = 6$ mm,阀芯行程取 $l = 1$ mm。

由于外界海水压力始终作用在锥阀的 A 口,即面积较小的一侧,而理论上取样时,部分外界海水已从入口单向阀进入到保压筒内,使内、外压力基本平衡,所以当电磁单向阀未通电时,阀芯基本都能保持关闭,故弹簧预紧力无需太大,适当取值即可。取预紧力 $F_p = 5$ N,则弹簧的最大恢复力:

$$F_R = 1.5 F_p = 7.5 \text{ N} \quad (7)$$

弹簧的刚度:

$$k = \frac{F_R - F_p}{l} = 2.5 \text{ N/mm} \quad (8)$$

阀芯与阀套间的摩擦力保守估计为 $f = 10$ N,取电磁铁推力安全系数为 $n = 1.3$,则电磁铁推力不应小于:

$$F = (f + F_R) \times n = 22.75 \text{ N} \quad (9)$$

实际电磁铁推力设计值为 50 N,完全满足要求。

2.3 泵的参数设计

泵的输出压力取决于系统过滤时的压力损失,而系统的压力损失主要来自于 4 个方面:入口单向阀、管道、滤膜、电磁单向阀。系统要能正常工作,必须满足:

$$P_s > P_v + P_p + P_m + P_{ev} \quad (10)$$

式中: P_s —泵的最大输出压力, P_v —入口单向阀压力损失, P_p —管道损失, P_m —滤膜压力损失, P_{ev} —电磁单向阀压力损失。

管道压力损失^[8]:

$$P_p = \frac{128\mu l}{\pi d^4} q \quad (11)$$

在该系统中,动力粘度 $\mu = 1.41 \times 10^{-3}$ Pa·s,管道长度 $l = 0.8$ m,管道直径 $d = 0.005$ m,流量 $q = 6.67 \times 10^{-5}$ m³/s,代入式(11)得 $P_p = 4\,907$ Pa。

由锥阀阀口流量公式推得单向阀压力损失:

$$P_v = \frac{\rho}{2} \left(\frac{q}{c_d A} \right)^2 \quad (12)$$

在该系统中, $c_d = 0.64$, $\rho = 10^3$ kg/m³, $A = 2.22 \times 10^{-5}$ m², $q = 6.67 \times 10^{-5}$ m³/s,代入式(12)得 $P_v = 0.11$ MPa,由于机械结构相同, $P_{ev} = P_v$ 。

由文献查得 $P_m = 0.8 \times 2 = 1.6$ MPa^[9],则:

$$P_v + P_p + P_m + P_{ev} = 1.825 \text{ MPa} \quad (13)$$

该系统所用三柱塞海水泵最高输出压力为 10 MPa,符合 $P_s > P_v + P_p + P_m + P_{ev}$ 的要求。

3 实验

本研究全套系统参加了 2010 年 10 月大洋一号的

南海海试,各模块搭载到如图 9 所示拖体,下放到深海进行实验。



图 9 拖体搭载取样系统

3.1 实验步骤

具体实验步骤如下:

- (1) 下潜前检查:测试电磁阀、电机、温度传感器等部件工作是否正常;蓄能器充氮气,电机和泵的压力补偿器充油,取样器内注水;检查各水密接插件、软管、毛细管的链接是否可靠。
- (2) 船开到预定的试验位置,在海况较好的情况下以 1~2 节的速度动力定位,下放设备到近底 20 m 深度。
- (3) 设定采集头电机转动时间和控制电压,开启电机,伸出采集头。
- (4) 选择一组取样器进行取样,打开相应的电磁阀,然后开启柱塞泵,设定电机的转动时间和控制电压,定时进行抽水过滤采样,并记录温度信息。
- (5) 一组取样结束后,关柱塞泵,然后关电磁阀;选择下一个采集点采集样品时重复步骤(4)、(5),可以采集满 5 组取样筒,也可以根据情况决定取样次数,实际试验取了两组。
- (6) 采样结束后开采集头电机,反转收回采集头。
- (7) 系统出水,记录样品压力,24 h 后观察压力变化情况,并转移样品。

3.2 实验结果

具体实验数据如表 1 所示。

表 1 实验数据

下潜深度	2 000 m
开泵时间	25 min
泵输出流量	4 L/min
过滤海水体积	100 L
泵实际输出压力	3 MPa
蓄能器预充气压	15 MPa
样品出水压力	19.5 MPa
取样点温度	4 ℃

取样结束后取出的过滤膜如图 10 所示,不难看出,0.45 μm 的滤膜上明显有许多深色杂质,而0.22 μm 的

滤膜上则几乎看不到杂质,可见多级膜过滤浓缩取样的设计显著提高了微生物样品的品质和浓度。

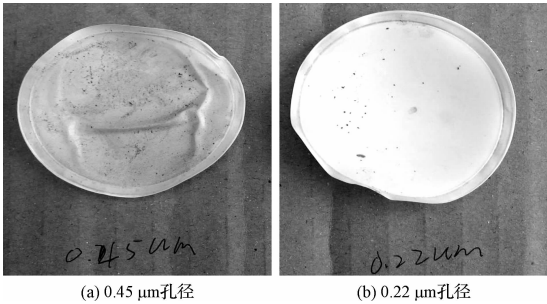


图 10 取样后的过滤膜

4 结束语

本研究设计了一种新型深海微生物多级膜取样系统,对传统的过滤浓缩取样技术进行了创新,设置了不同孔径的多级膜过滤,有效提高了样本品质。采用伸缩式的采集头设计,摆脱了对机械手操作的依赖,使系统更广泛地应用于各种拖体以及水下运载器上。笔者采用了模块化的设计理念,易于搭载布局;各模块分工明确,且都具有一定的通用性,能与外部其他模块组成新的系统。采用预充压力的蓄能器作为压力补偿装置,实现对样品的压力补偿。本研究提出的全套系统在大洋一号海试过程中,各模块工作正常,很好地完成了预定目标。

参考文献(References):

[1] CAROL T. Bacteria in the cold deep-sea benthic boundary layer and sediment-water interface of the NE Atlantic [J]. **FEMS Microbiology Ecology**,2000(33):89-99.

[2] JOHN P. A relation between deep-sea benthic oxygen demand and oceanic primary productivity [J]. **Oceanologica Acta**,2000(23):65-82.

[3] MADIGAN M T. OREN A. Thermophilic and halophilic extremophiles [J]. **Current Opinion in Microbiology**,1999(2):265-269.

[4] 黄中华,刘少军,金 波,等. 深海浮游微生物浓缩保压取样技术[J]. 机械工程学报,2006,42(3):212-216.

[5] 宫美乐,袁国梁. 我国微孔滤膜研究现状与发展 [J]. 膜科学与技术,2003,23(4):186-189.

[6] 王 磊. 皮囊式蓄能器在液压系统中的应用 [J]. 能源研究与信息,2005,21(2):100-105.

[7] 成大先. 机械设计手册单行本—常用设计资料 [M]. 北京:化学工业出版社,2004.

[8] 章宏甲,黄 谊. 液压传动 [M]. 北京:机械工业出版社,2000.

[9] 黄中华. 深海浮游微生物浓缩保压取样关键技术研究 [D]. 长沙:中南大学机电工程学院,2006.

[编辑:柴福莉]