

一种海水痕量元素 CTD 采集收放用敷塑纤维通讯缆的设计及检测试验

张宗兵^{1,2}, 刁新源^{1,2}, 任景玲³, 蒋 硕⁴, 苏 函⁴, 倪佐涛^{1,2}, 姜金光^{1,2},
丛石磊^{1,2}, 陈 杨^{1,2}, 艾金腾^{1,2}, 杨中林⁵, 周继续^{1,2}

(1. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院海洋大科学研究中心, 山东 青岛 266071; 3. 中国海洋大学, 山东 青岛 266100; 4. 华东师范大学, 上海 200241; 5. 上海瑞领电缆有限公司, 上海 201822)

摘要: 痕量元素及其同位素采集、预处理和分析在海洋研究中具有重要的作用, 对于认识全球环境变迁具有重要的价值。但其浓度在这些过程中易受沾污。本文结合海水痕量元素 CTD 现场采集工作环境, 工作拉力等特殊要求, 先后跟缆绳设计、生产制造厂家进行缆绳相关技术讨论、确定缆绳各项技术指标。设计敷塑纤维通讯缆, 并委托缆绳生产厂家加工出样缆两条。通过对样缆进行静态拉力试验验证缆绳自身工作拉力, 并通过成分分析、浸出试验验证最大化减少缆绳对于海中溶解态痕量金属的沾污。该研究结果可提高采样过程的可靠性, 保证数据的准确率。

关键词: 敷塑纤维通讯缆; 静态拉力试验; 成分分析; 浸出试验

中图分类号: P751 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2022)07-0088-07

DOI: 10.11759/hyxx20210826001

为了解决痕量元素及其同位素海洋研究中采样及预处理过程的沾污问题, 研发专用采样设备、减少采样环节、进行装备集成化一体化设计是解决这一技术问题的可行思路。近年来, 国内外海洋科学研究机构也尝试海水痕量元素洁净采集系统的研发。其中有报道的国外比较成功的有荷兰海洋研究所的相关装备, 该设备设计先进, 测试结果准确, 但是该设备采水器采用矩形结构, 采水作业所需操作空间较大, 一个独立集装箱无法同时完成采样、样品预处理及分析作业, 现在为非商业化产品^[1]。国内厦门大学通过全套设备的进口搭建了包含 8 km 长 Vectran 凯夫拉传输电缆及配套绞车、痕量元素专用的洁净采样 CTD 及葵花采水器、24 个 12 L 痕量采水瓶和 2 个洁净集装箱的集成洁净痕量元素采样及预处理系统, 目前已经在厦门大学的“嘉庚”号科考船应用^[2]。但是, 该套系统所用的缆绳为进口产品, 缆绳长度仅有 8 000 m, 对于一些深水站位具有一定的局限性。

目前, 国内科考船上配备的 CTD 缆绳多为铠装同轴缆, 铠装层金属元素容易在海水中析出, 因此研发一套敷塑纤维通讯缆, 可避免因缆绳沾污对分析测试结果准确性的影响, 提高采样过程的可靠性, 从源头上保证分析测试结果的可靠性, 对于提升我

国在痕量元素及同位素化学海洋学研究领域的能力具有重要的意义^[3-6]。

1 敷塑纤维通讯缆的设计

海水痕量元素 CTD 采集系统由洁净 CTD 采水器、敷塑纤维通讯缆(以下简称缆绳)、洁净绞车及伸缩臂、甲板单元、工控机等组成。如图 1 所示。

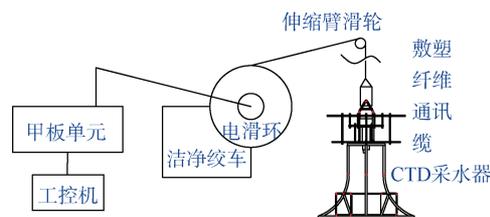


图 1 海水痕量元素 CTD 系统

Fig. 1 Seawater trace element conductivity, temperature, and pressure system

收稿日期: 2021-08-26; 修回日期: 2021-10-08

基金项目: “科学”号高端用户项目(KEXUE2019GZ01); 中科院重大科技基础设施维修改造项目(DSS-WXGZ-2021-0011)

[Foundation: “KEXUE” high-end user project, No. KEXUE2019GZ01; Chinese Academy of Sciences major science and technology infrastructure maintenance and renovation project, No. DSS-WXGZ-2021-0011]

作者简介: 张宗兵(1984—), 男, 工程师, 主要从事各类科考用绞车、缆绳研究, E-mail: zhangzongbing@qdio.ac.cn; 刁新源(1979—), 通信作者, 正高级工程师, 主要从事海洋环境调查, E-mail: diaoxinyuan@qdio.ac.cn

敷塑纤维通讯缆是同轴缆的一种，缆绳是两芯的，内部有两个同心导体，而导体和屏蔽层又共用同一轴心的电缆。甲板单元通过缆绳为水下单元提供电力，编译、压缩水下单元的串行数据流并传输到工控机。缆绳用于海上科学调查收放 CTD 并作为载体传输 CTD 数据。目前国内科考船上配备的万米同轴缆多为铠装同轴缆，由内导体、绝缘层、外导体、屏蔽层、铠装层(最外层)等组成。如图 2 所示。

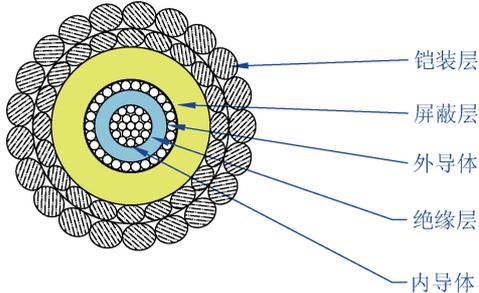


图 2 铠装同轴缆

Fig. 2 Armored coaxial cable

新设计的敷塑纤维通讯缆从内到外主要由内导体、绝缘层、外导体、护套、抗拉件(凯夫拉)、外护套等组成。

为了减少金属元素对于海洋中溶解态痕量金属的沾污，整个电缆由聚乙烯或聚氨酯材料的护套进行包裹，内外导体之间由绝缘材料交联聚乙烯(XLPE)

进行隔离，外导体与抗拉件之间采用高密度聚乙烯(HDPE)进行隔离。缆绳结构如图 3 所示。

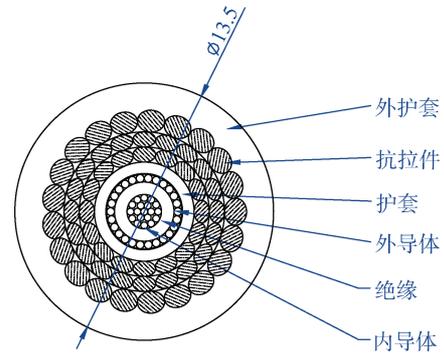


图 3 敷塑纤维通讯缆结构图

Fig. 3 Structure of a plastic-coated fiber communication cable

2 缆绳主要技术指标

要完成缆绳的主要技术指标的设计，首先要了解敷塑纤维通讯缆的工作环境：

- 1) 工作水深: 0~10 000 m;
- 2) CTD 重量: 5~10 kN;
- 3) 地质情况: 复杂多变;
- 4) 工作拉力 ≥ 15 kN。

本文结合缆绳工作环境，按照痕量采集洁净度要求设计敷塑纤维通讯缆的技术指标如表 1 所示。

表 1 敷塑纤维通讯缆主要技术指标

Tab. 1 Primary technical indicators of a plastic-coated fiber communication cable

主要指标 缆绳型号	罗切斯特铠装同轴缆(缆径 8.99 mm)	新设计敷塑纤维通讯缆(缆径 13.5 mm)
内导体	多股镀锡内导体, 横截面积 1.94 mm ²	多股镀锡内导体, 横截面积 2 mm ²
绝缘层	高密度聚乙烯	交联聚乙烯
外导体	多股镀锡铜丝束绞, 横截面积 3.22 mm ² , 绕包铜塑带	多股镀锡铜丝束绞, 横截面积 2.6 mm ² , 绕包铜塑带
内护套	无	HDPE, 壁厚 0.65 mm
抗拉层	2 层铠装钢丝	3 层轻质高强度纤维绳
外护套	无	HDPE, 壁厚约 1.4 mm
最小弯曲半径/mm	400	400
工作拉力/kN	17.8	15
最小破断力/kN	≥ 71.2	≥ 75
重量/比重/(g·m ⁻¹)	空气中: 469、海水中: 379	空气中: 160、海水中: 13

根据缆绳以上的技术指标, 委托相关缆绳制造厂家进行材料的选择及缆绳样缆的加工, 加工样缆 2 条如图 4 所示。



图 4 敷塑纤维通讯缆样缆

Fig. 4 Sample plastic-coated fiber communication cable

1) 样品 1

- 外护套: 聚氨酯(PU)
- 内护套: 高密度聚乙烯(HDPE)
- 绝缘层: 交联聚乙烯(XLPE)

2) 样品 2

- 外护套: 高密度聚乙烯
- 内护套: 高密度聚乙烯
- 绝缘层: XLPE

为了减少外护套在海水中释放出金属元素对海洋中溶解态痕量金属的沾污及产生对生物有毒物质, 护套材料选用非金属材料(聚氨酯/聚乙烯)并且耐海水腐蚀。缆绳表面光滑适于用高压空气或高温高压淡水清洗。

3 缆绳静态拉力试验

委托相关缆绳静态拉力试验厂家使用卧式拉力机进行缆绳静态拉力试验。

1) 工作拉力 15 kN

将测试缆固定在直径为 800 mm 的拉力轮上, 将工作拉力逐渐提升至 15 kN, 并保持 4 h, 记录开始时间、结束时间, 试验结束后检查测试缆外观变化。

检测结果: 测试缆外观完好;

2) 工作拉力 30 kN

将工作拉力逐渐提升至 30 kN, 并保持 4 h, 记录开始时间、结束时间, 试验结束后检查测试缆外观变化。

检测结果: 测试缆外观完好;

3) 破断力

使用 60 mm/min 的拉伸速度, 直至线缆破断, 记录最大拉力, 检查测试缆外观变化。

检测结果: 最大拉力 94.9 kN, 断裂处在拉力轮和测试缆切点处, 内部结构断裂, 绝缘层完好。缆绳静态拉力试验如图 5 所示。

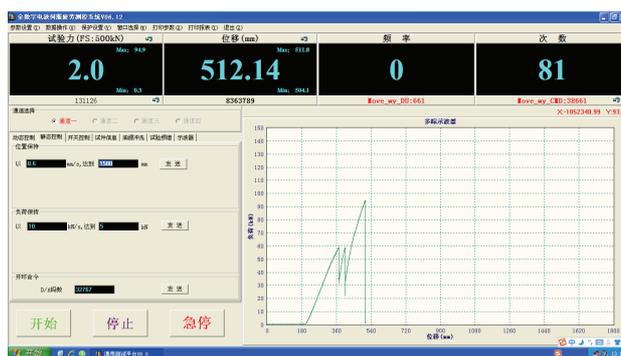


图 5 缆绳静态拉力试验

Fig. 5 Cable static tensile test

注: 仅针对外护套聚氨酯的样缆(样品 1)进行的静态拉力试验

通过缆绳静态拉力试验结果可以看出, 样缆可以满足海水痕量元素 CTD 采集对缆绳工作拉力的需求。

4 缆绳成分分析

委托相关成分分析公司, 对敷塑纤维通讯缆样缆外护套、绝缘层、内护套采用取样灰化的方式形成溶液, 对溶解到溶液中的相关元素进行分析。

前处理过程: 称取 0.20~0.25 g 样品, 破碎后样品于微波消解罐中。加入 3 mL 水、7 mL 硝酸和 2 mL 过氧化氢, 静置一段时间。

微波消解程序: 45 min 升温至 210 °C, 210 °C 保温 45 min。冷却、定容于 50 mL 容量瓶, 每个样品做 2 次平行测定, 测定结果如表 2 所示。

表 2 缆绳成分分析测定结果

Tab. 2 Cable composition analysis and measurement results

元素	Fe	Al	Mn	Ni	Cu	V	Zn	Pb	Co	Mo	Cr	Cd	U	Si	Zi	Ti	Ga
检出限 DL/(mg·kg ⁻¹)	6.69	5.03	0.32	0.15	2.5	0.05	5	0.5	0.2	0.1	5	0.05	0.01	0.1	0.1	0.35	0.02

标准: SN/T 4843—2017《橡胶制品中铬、钴、砷、溴、钼、镉、锡和铅的测定电感耦合等离子体质谱法》。

外护套成分分析如图 6 所示。

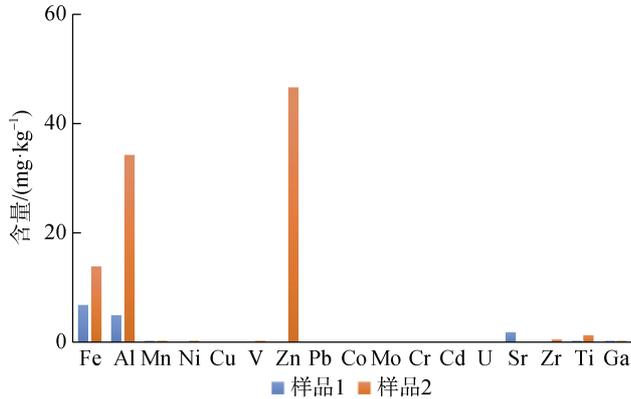


图 6 外护套成分分析

Fig. 6 Composition analysis of the outer sheath

内护套成分分析如图 7 所示。

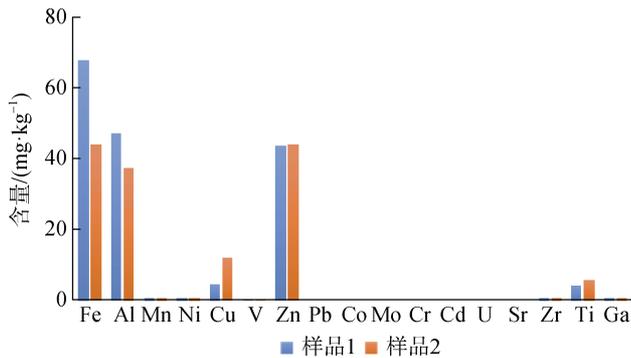


图 7 内护套成分分析

Fig. 7 Composition analysis of the inner sheath

绝缘层成分分析如图 8 所示。

成分分析结果:

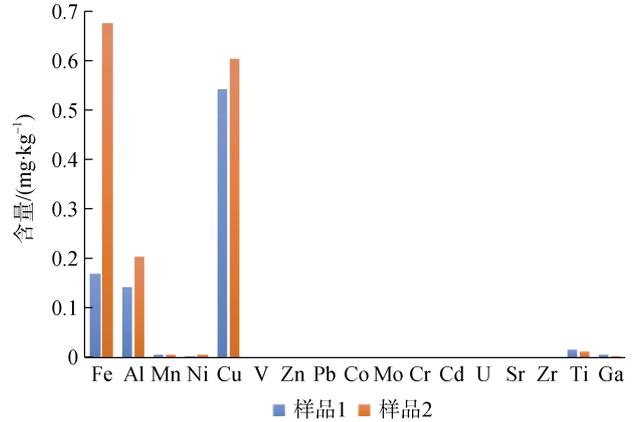


图 8 绝缘层成分分析

Fig. 8 Composition analysis of the insulating layer

1) 外护套成分分析: 样品 1(聚氨酯)元素含量基本小于样品 2(HDPE); 样品 2 Zn 出现异常高值;

2) 内护套成分分析: 样品 1(HDPE)元素 Fe、Al 含量高于样品 2(HDPE), 其余元素小于样品 2; 样品 1、2 中 Zn 均出现异常高值;

3) 绝缘层成分分析: 样品 1(XLPE)元素含量基本小于样品 2(XLPE); Fe、Cu 出现异常高值;

结合缆绳成分分析结果, 外护套为聚氨酯的样缆要比外护套为 HDPE 的要好一些。

5 缆绳浸出实验

浸泡时间: Q 水浸泡 15 d, 未过滤东印度洋海水浸泡 50 d。

样品保存: 用四重蒸馏的 HCl 将浸泡后 Milli-Q 和海水样本酸化到 pH<2, 共计 2 套 18 瓶。

Q 水浸泡后, 纤维缆 1#和 2#内层和外层浸出 Al、Mn、As、Pb 的浓度均很少, Fe 溶出在 0.35 nmol/L 左右。海水浸泡后, 内层材料浸出 Al 和 Fe 明显增加。缆绳浸出试验样本情况如表 3 所示。

表 3 缆绳浸出试验样本情况

Tab. 3 Cable leaching test sample situation

样本编号	材料特点	采样尺寸	外护套重量/g	里面第一层纤维衬套
样本 1	高密度聚乙烯外护套、黑色; 感觉比较硬挺、比较轻并在水中呈浮性	长度取 150 mm、壁厚 2~4 mm	9.315	3.275 g (纤维线由白色与黑色 2 种混杂编织)
样本 2	聚氨酯外护套、黑色; 感觉比较柔软、比较重并在水中呈沉性	长度取 150 mm、壁厚 2~4 mm	11.182	3.306 g (纤维线由白色与黑色 2 种混杂编织)

缆绳浸出试验 Al 的情况如图 9 所示。

缆绳浸出试验 Mn 的情况如图 10 所示。

缆绳浸出试验 As 的情况如图 11 所示。

缆绳浸出试验 Fe 的情况如图 12 所示。

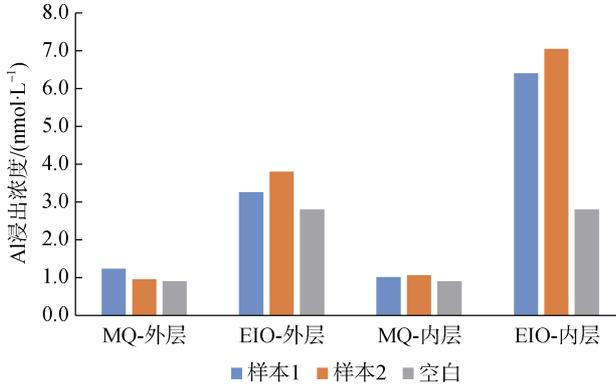


图 9 缆绳浸出试验 Al 的情况

Fig. 9 Cable leaching test of Al

注: MQ-外层表示外层材料在 Milli-Q 超纯水中浸泡; MQ-内层表示内层材料在 Milli-Q 超纯水中浸泡; EIO-外层表示外层材料在东印度洋海水中浸泡; EIO-内层表示内层材料在东印度洋海水中浸泡。

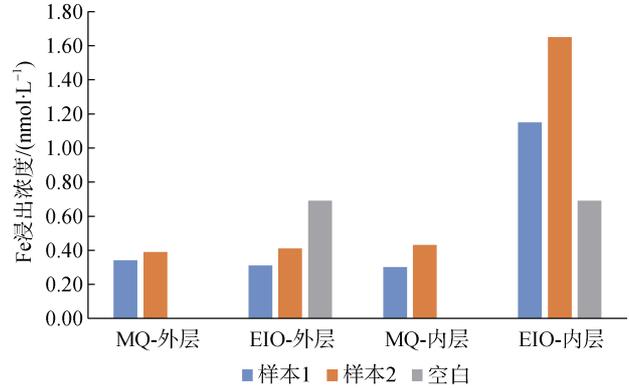


图 12 缆绳浸出试验 Fe 的情况

Fig. 12 Cable leaching test of Fe

注: MQ-外层表示外层材料在 Milli-Q 超纯水中浸泡; MQ-内层表示内层材料在 Milli-Q 超纯水中浸泡; EIO-外层表示外层材料在东印度洋海水中浸泡; EIO-内层表示内层材料在东印度洋海水中浸泡。

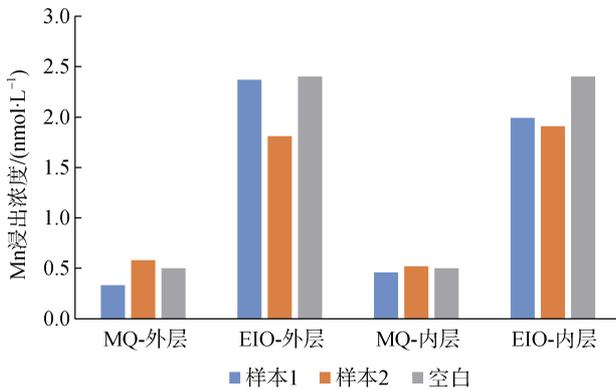


图 10 缆绳浸出试验 Mn 的情况

Fig. 10 Cable leaching test of Mn

注: MQ-外层表示外层材料在 Milli-Q 超纯水中浸泡; MQ-内层表示内层材料在 Milli-Q 超纯水中浸泡; EIO-外层表示外层材料在东印度洋海水中浸泡; EIO-内层表示内层材料在东印度洋海水中浸泡。

缆绳浸出试验 Pb 的情况如图 13 所示。

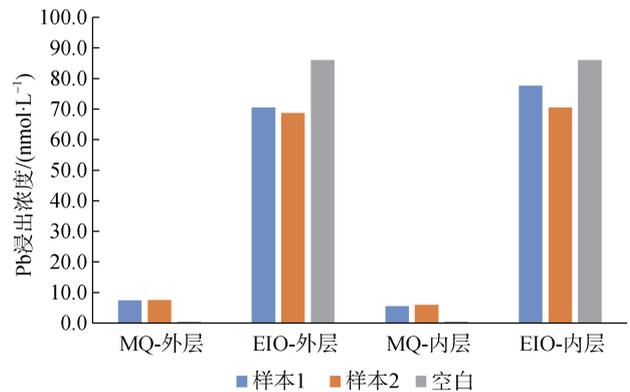


图 13 缆绳浸出试验 Pb 的情况

Fig. 13 Cable leaching test of Pb

注: MQ-外层表示外层材料在 Milli-Q 超纯水中浸泡; MQ-内层表示内层材料在 Milli-Q 超纯水中浸泡; EIO-外层表示外层材料在东印度洋海水中浸泡; EIO-内层表示内层材料在东印度洋海水中浸泡。

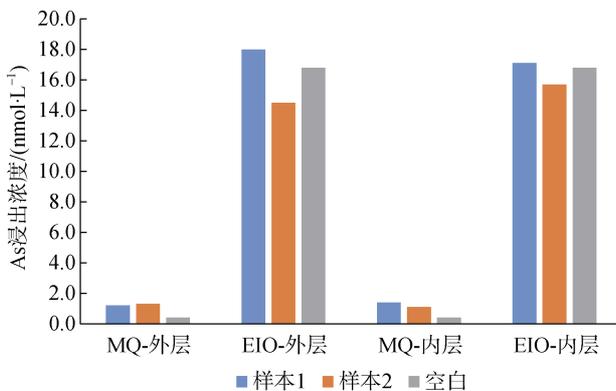


图 11 缆绳浸出试验 As 的情况

Fig. 11 Cable leaching test of As

注: MQ-外层表示外层材料在 Milli-Q 超纯水中浸泡; MQ-内层表示内层材料在 Milli-Q 超纯水中浸泡; EIO-外层表示外层材料在东印度洋海水中浸泡; EIO-内层表示内层材料在东印度洋海水中浸泡。

缆绳 Milli-Q 水浸出实验结果-Element 扫描多元素如表 4 所示。

6 结论

通过研发敷塑纤维通讯缆,并对缆绳进行静态拉力试验,可以满足痕量元素海水采集对缆绳工作拉力的需求;通过对缆绳进行成分分析、浸出试验验证缆绳外护套、绝缘层、内护套等主要部分金属元素的含量,研发的海水痕量元素 CTD 采集收放用敷塑纤维通讯缆可避免因缆绳沾污对分析测试结果准确性的影响,提高采样过程的可靠性,从源头

表 4 缆绳 Milli-Q 水浸出实验结果

Tab. 4 Cable Milli-Q water leaching test results

元素	Milli-Q 水空白/(nmol·L ⁻¹)	缆 1#内层/(nmol·L ⁻¹)	缆 1#外层/(nmol·L ⁻¹)	缆 2#内层/(nmol·L ⁻¹)	缆 2#外层/(nmol·L ⁻¹)
Pb (LR)	0.019	0.034	0.005	0.005	0.005
Al (MR)	11.333	7.111	5.444	15.296	12.000
Cr (MR)	0.288	0.135	0.115	0.096	0.308
Mn (MR)	0.036	0.036	0.018	0.036	0.055
Fe (MR)	3.518	0.589	0.696	0.768	1.500
Co (MR)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ni (MR)	0.204	0.290	0.290	0.307	0.273
Cu (MR)	0.110	0.157	0.173	0.898	0.630
Zn (MR)	2.292	1.046	0.692	2.000	1.246
Ga (MR)	0.029	0.014	0.014	0.029	0.014

注: LR 表示测元素时选择的分辨率为低分辨率, MR 表示测元素时选择的分辨率为中分辨率。

上保证分析测试结果的可靠性, 对于提升我国在痕量元素及同位素化学海洋学研究领域的能力具有重要的意义。

参考文献:

- [1] Baar H J W D, Timmermans K R, Laan P, et al., A new facility for ultraclean sampling of trace elements and isotopes in the deep oceans in the international Geotraces program[J]. *Marine Chemistry*, 2008, 111(1/2): 4-21.
- [2] 佚名. “嘉庚号”七个第一[J]. *船舶工程*, 2017, 39(3): 76.
Anon. The Seven Firsts of “TAN TAH KEE”[J]. *Ship Engineering*, 2017, 39(3): 76. <http://www.cnki.com.cn/Article/CJFDTOTAL-CANB201703020.htm>.
- [3] 张经. 化学海洋学的无机痕量分析-思考与实践[M]. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 2002: 125.
ZHANG Jing. *Inorganic trace analysis in chemical oceanography-consideration and practice*[M]. Qingdao: Qingdao Ocean University Publishing House, 2002: 125.
- [4] Anderson R F, Henderson G M. GEOTRACES gathers speed[J]. *Global Change News Letter*, 2004, 60: 10-13.
- [5] Martin J H, Fitzwater S E. Iron-deficiency limits phytoplankton growth in the Northeast Pacific Subarctic[J]. *Nature*, 1988, 331(6154): 341-343.
- [6] 倪佐涛. 一种移动式海水痕量元素洁净采集实验室的设计[J]. *海洋科学*, 2020, 44(6): 137-140.
NI Zuotao. Design of a mobile clean collection laboratory for trace elements in seawater[J]. *Marine Sciences*, 2020, 44(6): 137-140.

Design and test of a plastic fiber communication cable for CTD collection and retraction of seawater trace elements

ZHANG Zong-bing^{1,2}, DIAO Xin-yuan^{1,2}, REN Jing-ling³, JIANG Shuo⁴, SU Han⁴, NI Zuo-tao^{1,2}, JIANG Jin-guang^{1,2}, CONG Shi-lei^{1,2}, CHEN Yang^{1,2}, AI Jin-teng^{1,2}, YANG Zhong-lin⁵, ZHOU Ji-xu^{1,2}

(1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Marine Science Research Center, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 3. Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 4. East China Normal University, Shanghai 200241, China; 5. Shanghai Ruiling Cable Co., Ltd., Jiading District, Shanghai 201822, China)

Received: Aug. 26, 2021

Key words: plastic-coated fiber communication cable; static tensile test; component analysis; leaching test

Abstract: The collection, pretreatment, and analysis of trace elements and their isotopes play an important role in marine research and are highly valuable for understanding global environmental changes. However, trace element concentrations are susceptible to contamination in these processes. In this paper, bearing in mind the special requirements for the environment, working tension, and other special aspects of the seawater trace element conductivity, temperature, and pressure field collection work, we have successively discussed the related technology of the cable regarding its design with the cable manufacturer to determine its technical indicators. We designed a plastic fiber communication cable and commissioned the manufacturer to process two sample cables. The static tension test of the sample cable verified the working tension of the cable itself, and the verification of component analysis and leaching test minimized the cable's contamination of dissolved trace metals in the sea. The research results could improve the reliability of the sampling process and ensure data accuracy.

(本文编辑: 赵卫红)